

Федеральное агентство по образованию РФ  
ГОУ ВПО «Уральский государственный  
технический университет — УПИ»

О.П. ОНОРИН, Н.А. СПИРИН,  
В.Л. ТЕРЕНТЬЕВ, Л.Ю. ГИЛЕВА,  
В.Ю. РЫБОЛОВЛЕВ, И.Е. КОСАЧЕНКО,  
В.В. ЛАВРОВ, А.В. ТЕРЕНТЬЕВ

# КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА

Под редакцией профессора,  
доктора технических наук Н.А. Спирина

Екатеринбург 2005

УДК 669.162.2:004.94  
ББК 34.323в6  
К63

Рецензент:  
член-корреспондент РАН, генеральный директор научного  
центра РФ ОАО «Уральский институт металлов» Л.А. Смирнов

Авторы О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.Л. Терентьев,  
Л.Ю. Гилева, В.Ю. Рыболовлев, И.Е. Косаченко, В.В. Лавров,  
А.В. Терентьев

**К63 Компьютерные методы моделирования доменного  
процесса / Под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УГТУ—  
УПИ, 2005. 301 с.**

ISBN 5—321—00557—5

В монографии представлено описание разработанных математических моделей, алгоритмов и компьютерных программ для решения комплекса технологических задач в области доменного производства. Большинство программ опробованы в промышленности, их можно рекомендовать для использования в автоматизированных рабочих местах инженерно-технического персонала доменного цеха, решении комплекса стратегических задач при планировании производства, поставок железорудного сырья, топлива, оптимального управления энергоресурсами.

Предназначена для инженерно-технических специалистов в области доменного производства, студентов старших курсов металлургических факультетов вузов.

УДК 669.162.2:004.94  
ББК 34.323в6

ISBN 5—321—00557—5 © ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет — УПИ», 2005  
© О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.Л. Терентьев, Л.Ю. Гилева, В.Ю. Рыболовлев, И.Е. Косаченко, В.В. Лавров, А.В. Терентьев, 2005

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	4
<b>Глава 1. МОДЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫПЛАВКЕ ЧУГУНА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ</b> .....	11
1.1. Принципы построения, общая архитектура современной информационно-моделирующей системы доменной плавки .....	11
1.2. Пример реализации АСУ ТП доменной плавкой на АО ММК .....	33
1.3. Состояние вопроса в области математического моделирования доменного процесса .....	48
1.4. Современные принципы построения модельных систем поддержки принятия решений и пакетов прикладных программ для управления технологией доменной плавки .....	63
<b>Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА</b> .....	69
2.1. Построение концептуальной модели .....	69
2.2. Подсистема теплового состояния доменной печи ( $S_1$ ) ...	73
2.3. Подсистема дутьевого и газодинамического режимов доменной плавки ( $S_2$ ) .....	96
2.4. Подсистема шлакового режима ( $S_3$ ) .....	125
2.5. Интегрированный пакет прикладных программ «Автоматизированное рабочее место инженерно-технического персонала доменной печи» .....	147
<b>Глава 3. АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО УПРАВЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЕЙ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ</b> .....	171
3.1. Материальные и тепловые балансы доменной плавки ..	171
3.2. Выбор оптимального состава железорудной части агломерационной и доменной шихт .....	183
3.3. Алгоритм расчета задувочных шихт .....	202
3.4. Алгоритм корректировки теплового режима доменной печи на остановках .....	222
3.5. Оптимальное управление топливно-энергетическими ресурсами доменного цеха .....	246
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b> .....	284

*Памяти нашего дорого учителя,  
Бориса Ивановича Китаева,  
посвящается*

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Современная тенденция развития науки и техники характеризуется развитием, внедрением и широким использованием компьютерных систем поддержки принятия решений в АСУП и АСУ ТП, в основу которых положены методы математического моделирования. Сегодня на передовых металлургических предприятиях России функционируют или создаются мощные распределенные базы и банки данных. Это позволяет практически полностью решать проблемы хранения, контроля, защиты, ввода, редактирования и извлечения информации, а также формирования необходимых отчетных данных. В то же время отечественный и зарубежный опыт убедительно доказывает, что развитие предприятий металлургического комплекса, решение проблем энергосбережения, повышения качества и конкурентоспособности продукции на мировом рынке требуют усовершенствования систем использования информации, применяемых как для управления технологическими процессами, так и управления производством в целом. Информация сама по себе как таковая зачастую мало что дает для анализа и прогноза, для принятия решений и контроля за их исполнением. Необходимы надежные способы переработки информационного «сырья» в готовый продукт. Одним из важнейших условий создания эффективных АСУ таких объектов является разработка математических моделей, которые позволяют получить расчетным путем новую обширную информацию о процессах, происходящих в промышленных агрегатах, осуществлять оптимизацию их режимных параметров, разрабатывать и совершенствовать алгоритмы управления технологическими и техническими системами. Интеллектуальным ядром такой переработки информации является математическое моделирование.

Особое место среди металлургических переделов современной металлургии занимает доменное производство как самое энергоемкое, на долю которого приходится до 50 % топлива, используемого в черной металлургии. Анализ показывает, что доменное производство относится к классу сложных и распределенных систем.



Доменная плавка является сегодня и остается на дальнюю перспективу важнейшим, наиболее сложным, самым энергоемким и одновременно самым эффективным определяющим технологическим модулем в схемах производства черных металлов. Она формирует облик всего металлургического комплекса [1—7].

Под современной технологией доменной плавки понимается комплекс технических приемов и средств их реализации, обеспечивающий выплавку требуемого количества чугуна заданного состава в доменных печах, оснащенных оборудованием и аппаратурой, обеспечивающих бесперебойную подачу шихты, уборку продуктов плавки и эффективное управление процессами при использовании подготовленного сырья и высоконагретого комбинированного дутья при максимальной утилизации продуктов плавки и вторичного сырья. Такая технология должна обеспечивать ровную работу и высокую сохранность доменных печей при максимальной экономичности результатов плавки для данных условий и экологических ограничений [8—13].

Повышение требований к качеству чугуна, ужесточение экономических и экологических требований диктуют необходимость дальнейшего повышения эффективности доменной плавки.

Анализ технологий получения чугуна, альтернативных доменной плавке, показал, что автономные агрегаты, являющиеся по существу фрагментами доменной печи, не имеют преимуществ в производстве массового металла. По данным фирмы «Хэтч», в мире с использованием доменных печей выплавляется в год около 600 млн тонн металла и пока лишь 30 млн тонн внедоменными способами. По мнению ведущих отечественных и зарубежных ученых и производителей, перспективы развития массовой металлургии связаны именно с доменным процессом и интегрированной классической схемой «подготовка сырья — доменная печь — конвертор» [14].

Энергетические, экологические, экономические характеристики и интегральные оценки доменной плавки с низким расходом кокса превосходят характеристики всех известных способов прямого получения железа. При вдувании в фурменные очаги горячих продуктов газификации угля на большинстве доменных печей возможно снижение расхода кокса до 300 кг/т. Такое развитие доменной плавки настолько укрепляет ее определяющие позиции в металлургии, что в обозримой перспективе альтернативных путей пока не предвидится [5—7, 9, 10].

Современная доменная печь объемом 5000 м<sup>3</sup> в сутки выдает 12 тыс. тонн чугуна, 4 тыс. тонн шлака, 20 млн м<sup>3</sup> колошникового газа. Для производства этого количества чугуна в печь надо подать до 20—23 тыс. тонн железорудного сырья, кокса, 14 млн м<sup>3</sup> горячего дутья и 1,5 млн м<sup>3</sup> природного газа. Лучшие отечественные доменные печи, оснащенные современными системами автоматизации, характеризуются расходом кокса примерно 400—410 кг/т чугуна при минимально теоретически допустимом около 300 кг/т чугуна и удельной производительности по чугуну 2,5—2,7 т/(м<sup>3</sup>·сут). За рубежом ряд крупных доменных печей работают с расходом кокса 320—350 кг/т чугуна при удельной производительности 2,5—2,9 т/(м<sup>3</sup>·сут) [3, 4, 9, 15]. Естественно, что такая огромная концентрация мощности в одном технологическом агрегате и в доменном цехе в целом, не имеющая аналогов не только в металлургии, но и других областях техники, требует научно обоснованных, безошибочных методов управления доменным процессом.

Одна из главных задач совершенствования доменного процесса — сокращение расхода кокса, основного энергоносителя, ограничение по производству которого (дефицит кокса) во многом определяет и развитие черной металлургии.

В реальных шихтовых условиях бывшего СССР в период социальной стабильности (до 1991 г.) на лучших доменных печах достигалась среднемесячная производительность 2,5—3,0 т/(м<sup>3</sup>·сут) при удельном расходе кокса 390—400 кг/т чугуна. Однако кризисные явления в социально-экономической сфере не позволили реализовать в последние годы все имеющиеся технические возможности.

Так, в России сокращение производства чугуна и производительности доменных печей составило с 61 (1990 г.) до 48,3 млн тонн в год (2003 г.), а увеличение расхода кокса с 469 до 494 кг/т чугуна. За этот период в мировой металлургии произошли серьезные положительные сдвиги в технологии и технике производства чугуна. При этом мировой уровень выплавки чугуна остался примерно на прежнем уровне и составляет 540 млн тонн [9, 10, 15]. По оценкам специалистов, несмотря на все трудности состояние доменного производства России по-прежнему остается на высоком техническом и технологическом уровнях. Как правило, доменная плавка ведется на хорошо подготовленном сырье. Доля агломерата и окатышей в шихте составляет 98—100 % при содержании железа 56—59 % [1, 2].

Задача развития доменного производства России в сложившихся социально-экономических условиях требует разработки стратегии развития технологии на каждом предприятии и последовательного решения комплекса структурно-финансовых, организационно-хозяйственных и научно-технических проблем. В области управления доменным процессом необходимо на основе разработки средств получения объективной информации о параметрах технологического процесса и имеющихся возможностей использования средств интеллектуального обеспечения максимально приблизить управление доменным производством к автоматизированному [2].

Современные тенденции по созданию и развитию АСУ ТП доменных печей характеризуются последовательным оснащением всех печей надежными средствами измерений и контроля, компьютерной техникой, дальнейшим применением передовых системотехнических решений. Анализ уровня автоматизации доменных печей металлургических предприятий России в сопоставлении с достигнутым позволяет сегодня говорить о лидирующих позициях ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ОАО «Северсталь», ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат», ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат», ОАО «Западносибирский металлургический комбинат» [16—20].

Современная система управления доменной плавкой представляет собой иерархическую многоуровневую систему:

*Первый, нижний уровень.* Инструментальная система на базе КИПАиА. Представляет собой набор датчиков, исполнительных механизмов и других устройств, предназначенных для сбора первичной информации и реализации управляющих воздействий. Этот уровень называется I/O (Input/Output, ввод/вывод).

*Второй уровень.* Базовая автоматизация. Уровень предназначен для непосредственного управления производственным процессом с помощью различных устройств связи с объектом (УСО), программируемых логических контроллеров (PLC — Programmable Logic Controller). Это уровень Control Level — простое управление.

*Третий уровень.* Супервизорная система, называется SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition — буквально сбор данных и диспетчерское управление). На уровне (SCADA Level) осуществляются диспетчеризация систем сбора данных и оперативное управление технологическим процессом, принимаются так-

тические решения, прежде всего направленные на достижение стабильности процесса.

Четвертый уровень. Подсистема управления комплексом доменных печей. Уровень MES (Manufacturing Execution Systems — или системы управления технологиями, исполнения производства). Этот уровень выполняет упорядоченную обработку информации о ходе процессов в различных доменных печах цеха, обеспечивает управление комплексом доменных печей (цеха в целом), а также является источником необходимой информации в реальном времени для более высокого, самого верхнего уровня управления. Данный уровень характеризуется необходимостью решения задач оперативной упорядоченности первичной информации из цеха и передачи этой информации на верхний уровень планирования ресурсов всего предприятия. Решение этих задач на данном уровне управления обеспечивает оптимизацию управления ресурсами цеха как единого организационно-технологического комплекса по заданиям, поступающим с верхнего уровня, и при оперативном учете текущих параметров, определяющих состояние объекта управления.

В доменном производстве России и стран СНГ при капитальных ремонтах 1-го разряда обязательно устанавливают первые нижние два уровня, верхние же два уровня на ряде доменных печей отсутствуют вообще, либо имеются только отдельные локальные модули. Некоторый перечень задач и функций верхнего 3-го уровня реализован в СНГ только на отдельных доменных печах ОАО ММК, ОАО «Северсталь», ОАО НЛМК, доменная печь № 3 АК «Тулачермет» и некоторых других. Решений задач для верхнего 4-го уровня управления явно недостаточно. В связи с этим, в отличие от современных зарубежных систем, экономическая отдача вложений в АСУ ТП остается в СНГ низкой. Имеется существенный разрыв между математическими моделями, разрабатываемыми различными коллективами исследователей, и их реальным, практическим внедрением в АСУ доменной плавки [16].

Цель данной книги заключается в описании разработанных математических моделей, алгоритмов и компьютерных программ для решения комплекса технологических задач в области доменного производства именно для верхних SCADA и MES уровней.

Большинство программ опробованы в промышленности, их можно рекомендовать для использования в автоматизированных

рабочих местах инженерно-технического персонала доменного цеха, решении комплекса стратегических задач при планировании производства, поставок железорудного сырья, топлива, оптимального управления энергоресурсами.

Подбор материала отвечает концепциям отечественной Уральской школы математического моделирования доменного процесса, основатель — профессор Борис Иванович Китаев, вековой юбилей которого скоро будет отмечаться научно-технической общественностью страны. Прошло более полувека с того времени, когда Б.И. Китаевым были впервые установлены закономерности изменения теплоемкости потоков шихты и газа, предложена схема теплообмена в доменной печи и сформулированы основные положения, определяющие ее тепловую работу [21—25]. Идеи, изложенные в этих работах, оказались чрезвычайно оригинальными и плодотворными и на многие годы определили бурное развитие теории доменного процесса. Во многом именно в результате использования теории теплообмена удалось предложить методы контроля и управления тепловым состоянием доменной печи, которые нашли свое отражение в данном труде. Памяти нашего дорого учителя мы и посвящаем эту книгу.

Монография написана совместно сотрудниками кафедр «Теплофизика и информатика в металлургии», «Металлургия железа и сплавов» УГТУ—УПИ, специалистами доменного цеха и центра управления автоматизации АСУ ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Авторы считают своим долгом отметить вклад в написание книги канд. техн. наук, доцента кафедры «Металлургия железа и сплавов» ГОУ ВПО УГТУ—УПИ С.А. Загайнова. Авторы выражают ему искреннюю благодарность за постановку задач математического моделирования теплового режима доменной плавки, разработку методологии и алгоритмов их решения, а также за участие в написании параграфов 2.2 и 2.5.

Авторы признательны нашим учителям — проф., д-ру техн. наук В.К. Грузинову засл. деятелю науки и техники РФ, проф., д-ру техн. наук В.Г. Лисиенко, доценту, канд. техн. наук Н.Г. Маханьку проф., д-ру техн. наук Ю.Н. Овчинникову, проф., д-ру техн. наук Е.Л. Суханову, проф., д-ру техн. наук В.С. Швыдкому, засл. деятелю науки и техники РФ, проф., д-ру техн. наук Ю.Г. Ярошенко за помощь в постановке и исследовании затронутых в книге вопросов. Мы признательны также коллегам по ра-

боте за научные дискуссии, в ходе которых формировались основные идеи, нашедшие отражение в монографии.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность начальнику лаборатории АСУ аглодоменного производства центра информационных технологий ОАО ММК П.Н. Полякову, программисту центра АСУ ОАО Е. Мироновой, аспирантам УГТУ—УПИ К.А. Шипанову, А.И. Перминову, оказавшим большую помощь в работе над книгой. Свой вклад в создание книги внесли и студенты-отличники, именные стипендиаты — К.Е. Бессонова, И.А. Бабин, М.И. Гайдучков, осуществившие программную реализацию отдельных алгоритмов расчетов.

Авторы благодарят Генерального директора научного центра Российской Федерации ОАО «Уральский институт металлов», члена-корреспондента РАН Л.А. Смирнова и заведующего отделом подготовки сырья и доменного производства этого же института, канд. техн. наук В.А. Кобелева за ценные замечания, сделанные при рецензировании книги. Учет этих замечаний, несомненно, способствовал улучшению содержания представленного материала.

Авторам представляется, что выход в свет этой книги является своевременным. В то же время авторы осознают, что книга не лишена некоторых недостатков, а с выходом ее в свет работа над совершенствованием, созданием новых алгоритмов и пакетов прикладных программ в области управления технологией доменной плавки будет продолжаться.

Авторы просят читателей свои отзывы направлять по адресам:

- 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет — УПИ»;
- 455002, Магнитогорск, ул. Кирова, 93, ОАО ММК, доменный цех.

**Мы будем рады узнать ваше мнение!**

## Глава 1

# **МОДЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫПЛАВКЕ ЧУГУНА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

### **1.1. Принципы построения, общая архитектура современной информационно-моделирующей системы доменной плавки**

Архитектура современных информационных систем технологических процессов (систем компьютерной автоматизации, АСУ ТП) представляет собой многоуровневую систему и строится на основе открытых технологий с использованием стандартных модулей, объединенных в сеть помехозащищенным интерфейсом [14, 16—19, 26—32].

Архитектура этих систем строится на принципах:

- стандартности, модульности, распределенности, открытости;
- обеспечения требуемыми метрологическими характеристиками измерительных каналов во всем диапазоне внешних воздействий окружающей среды;
- способности работать в широком диапазоне температур, вибраций, электромагнитных электрических и сетевых помех;
- обеспечения высокой надежности (время наработки на отказ более 100000 часов);
- наличия набора измерительных средств, сопрягаемых с обширным парком датчиков и исполнительных механизмов.

Система должна:

- обеспечивать высокую производительность, предельно высокую реактивность режимов реального времени на нижнем уровне управления при количестве обрабатываемых каналов ввода-вывода, достигающем, как правило, до нескольких тысяч;
- обеспечивать требование отказоустойчивости, не допускающее при непрерывном круглосуточном режиме эксплуатации снижения производительности при возникновении неисправностей и непрерывной дистанционной диагностике работоспособности комплекса;

- отвечать обобщенным требованиям промышленного исполнения, т. е. обладать устойчивостью в процессе эксплуатации в тяжелых промышленных условиях;
- отвечать стандартам и требованиям открытых систем, обеспечивающим их интеграцию с аппаратными и программными средствами различных производителей;
- обеспечивать интеграцию в локальные офисные и промышленные сети;
- иметь базовое программное обеспечение и инструментальные средства проектирования отказоустойчивых АСУ ТП в различных операционных системах.

Под открытой системой мы будем понимать систему, построенную по магистрально-модульному принципу на основе совместимых унифицированных компонентов, не имеющих логических ограничений по наращиванию, сопровождаемую необходимой информацией по всем видам обеспечения и отвечающую требованиям работы в реальном масштабе времени [16—18].

Выбор конкретной структурной схемы информационной системы зависит от множества факторов, в частности от сложности системы, количества датчиков и исполнительных механизмов, скорости обновления информации, требований к надежности, резервированию, противоаварийной защите и т. д. Так, системы, имеющие менее 600—1000 входов-выходов, можно считать малыми, от 600 до 3000 — средними, более 2000—3000 — большими [17].

Конечной целью разработок информационных систем, и систем управления комплексом доменных печей (цехом) в частности, является создание системы управления, которая обеспечивает нормальную работу производства в целом при минимальной себестоимости продукции с учетом ограничений, обусловленных требованиями технологии и возможностями оборудования.

При анализе работы доменной печи ее следует рассматривать как управляемую технологическую систему. Упрощенно комплекс доменной печи может быть представлен схемой, приведенной на рис. 1.1.

Заметим, что при анализе любого технологического процесса можно выделить три основные группы переменных [17, 34, 35]:

- режимные параметры, отражающие средние значения контролируемых входных воздействий при установившемся состоянии технологического процесса ( $V$ ,  $U$ );
- средние значения количественных и качественных показателей технологического процесса ( $Y$ );



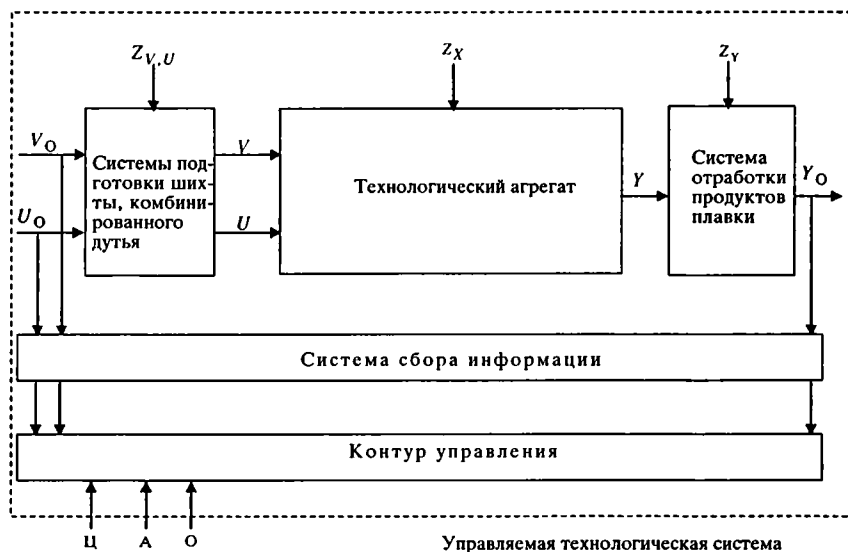


Рис. 1.1. Доменная печь как управляемая технологическая система:

$V_0, U_0, Y_0$  — отчетные данные о параметрах и показателях работы доменной печи;  $V$  — входные воздействия;  $U$  — управляющие воздействия;  $Y$  — выходные показатели процесса;  $Z_X$  — неконтролируемые изменения внутренних характеристик процесса;  $Z_{V,u}$  — неконтролируемые изменения входных и управляющих воздействий;  $Z_Y$  — потери чугуна со скрапом и шлаком, вынос колошниковой пыли;  $\Pi$  — целевая функция управления;  $A$  — алгоритм управления;  $O$  — ограничения

- возмущения, которые условно можно разделить на внешние, приложенные к входам и выходам процесса ( $Z_{V,u}, Z_Y$ ), и внутренние, приложенные к состоянию процесса ( $Z_X$ ).

Заметим, что количество контролируемых входных параметров  $V > 150$  (с учетом показателей химического состава и массы отдельных компонентов шихты), управляющих воздействий «сверху» и «снизу»  $U$  около 10 (система загрузки, дутьевые параметры и т. д.), основных управляемых выходных показателей процесса  $Y > 10$ .

Показателями (целевой функцией, критериями) ( $\Pi$ ) технологической эффективности работы печи, технологического персонала и информационной системы являются: удельный расход кокса, производительность печи, выход кондиционного чугуна по содержанию серы в чугуне, температура жидких продуктов плавки в соответствии с требованиями последующего сталепла-

вильного производства. При этом должны быть выполнены ограничения (О) на технологию доменной плавки, т. е. обеспечена минимальная вероятность попадания технологического состояния печи в так называемые критические области (критические, аварийные режимы работы).

Работа агрегатов комплекса находится под постоянным наблюдением сменных технологов, за которыми остается ведущая роль при решении многих задач управления. В связи с этим такой технологический комплекс следует относить к классу интерактивных человеко-машинных автоматизированных информационных систем. Основной задачей при управлении доменным процессом является стабилизация теплового состояния печи. Главными причинами колебаний теплового состояния являются изменения качества шихты, отклонения температуры и состава дутья от заданных значений ( $Z_{v,u}$ ), нарушения в распределении материалов и газов по сечению печи ( $Z_r$ ). Для обеспечения стабилизации теплового режима требуется обеспечивать постоянный баланс основных составляющих режима плавки: нагрев материалов в печи, дренажные свойства шихтовых материалов, положение границ и формы зон вязкопластических материалов, плавления чугуна, процессы шлакообразования в нижних зонах печи и работа фурменного очага. Переходные процессы, связанные с действием возмущений, приводят к изменению теплового состояния процесса и, следовательно, к изменению состава продуктов плавки. При этом доменная печь как объект управления обладает большой инерционностью по отдельным каналам воздействий (постоянная времени достигает 2—4 часов) и запаздыванием (время запаздывания объекта 6—7 часов). Так, при изменении состава шихты переходный процесс длится до 15—20 часов [8, 10, 11, 36]. Указанные обстоятельства, безусловно, значительно усложняют процесс управления. Компенсация колебаний химического состава чугуна осуществляется технологами в основном за счет изменения массы кокса в подачу или изменения дутьевых параметров. Величина управляющих воздействий определяется статическими и динамическими характеристиками процесса. Эти характеристики являются нелинейными и изменяются во времени при колебаниях условий плавки, требуя соответствующего изменения величины управляющих воздействий [8, 10, 11, 36—38].

Современная доменная печь является организованной управляемой интерактивной системой (см. рис. 1.1). Состояние этой

системы определяется закономерностями комплекса физических процессов, протекающих в доменной печи, особенностями технологии, зависящей от конкретных топливно-сырьевых условий и оборудования доменной печи, включающей системы подготовки шихты, комбинированного дутья, систему отработки продуктов плавки, и принятым способом управления.

В связи с этим при оценке эффективности доменной плавки приходится анализировать не только процесс выплавки чугуна в доменной печи с его комплексом физических закономерностей, а также организованную функциональную систему с системами сбора информации, управления в контуре обратной связи. При этом под системой управления понимаются как используемые технические средства контроля и управления с присущими им метрологическими особенностями, так и участвующие в управлении технологии (лица, принимающие решения), целенаправленные действия которых обеспечивают управление доменным процессом.

Таким образом, автоматизированный технологический комплекс доменной печи как объект контроля и управления можно характеризовать следующими признаками:

- большим объемом контролируемых переменных и расчетных признаков;
- низкой прозрачностью процесса, так как отсутствует возможность непосредственного контроля развития отдельных стадий процесса выплавки чугуна;
- существенным запаздыванием в получении информации о выходных показателях процесса (продуктах плавки), в связи с чем результаты непосредственного контроля часто не позволяют определять первопричину расстройства хода печи;
- глубокой взаимосвязью всех процессов плавки при ограниченности ресурсов на управление;
- наличием случайных измерительных помех различной природы и характера, что снижает качество информации.

Комплексный подход к учету всей совокупности перечисленных признаков диктует необходимость построения самых современных информационно-управляющих систем.

### **Существующие принципы построения автоматизированной информационной системы доменной плавки**

В настоящее время в промышленно развитых странах все доменные печи в той или иной мере оборудованы АСУ ТП. Функциональные возможности этих АСУ ТП варьируются от чисто

информационных до прямого управления процессом. Архитектура автоматизированных систем, как правило, иерархическая с несколькими уровнями управления [14, 16—18, 27—32, 39].

Одной из первых доменных печей, оборудованных многоуровневой распределенной АСУ ТП, является доменная печь № 6 завода фирмы «Кавасаки сэйтэцу» в Тибе (Япония). Первая очередь этой АСУ ТП вступила в строй еще в 1974 г. При ее создании была использована концепция четырехуровневого построения автоматизированной системы, которая в самых общих чертах сохраняется и в настоящее время. Вопросы автоматизации широко освещены на международных конгрессах доменщиков в Европе, США, Японии, СНГ и в рекламных материалах фирм [16, 40—48]. Затраты в целом на КИПиА АСУ ТП оцениваются ведущими западными фирмами примерно в 15 % от вложений в капитальный ремонт доменной печи. Так, в мае 1998 г. фирма Kawasaki Steel (Япония) ввела на доменной печи № 6 многоуровневую систему базовой автоматизации, экспертные системы, централизованную систему стратегического планирования и ситуационного управления производством чугуна.

Одна из первых в бывшем СССР АСУ ТП была разработана и внедрена в 1974 г. на доменной печи № 9 металлургического комбината «Криворожсталь». В дальнейшем АСУ ТП создавались на ряде отечественных доменных печей: № 6 НЛМК (1978 г.), № 2 КМК (1984 г.), ЧерМК (1986 г.), № 3 ЗСМК (1988 г.), № 3 «Азовсталь», № 5 Кузнецкого металлургического комбината и др. В последующий период продолжались дальнейшая модернизация и совершенствование этих систем.

АСУ ТП крупнейшей в мире доменной печи № 5 ЧерМК, объемом 5500 м<sup>3</sup>, является трехуровневой иерархической распределенной системой.

*Нижний уровень* автоматизации включает средства и системы измерения, контроля, стабилизации и управления технологическими параметрами.

*Средний* — подсистемы автоматического контроля и регулирования отдельными технологическими процессами и агрегатами с применением программируемых контроллеров.

*Верхний* — ряд АСУ и подсистем комплексного контроля и управления технологического процесса доменной плавки с использованием ЭВМ СМ-2М, а также специализированных вычислительных устройств фирм «Тиссен Шталь» и «Сименс АГ».

Эти уровни распределенной структуры информационной системы должны обеспечивать в режиме круглосуточной эксплуатации надежную экономичную экологически безопасную работу доменных печей с заданными потребителем (сталеплавильным производством) характеристиками качества выплавляемого чугуна.

В последующем основные концепции построения АСУ ТП доменной печи № 5 ЧерМК были учтены при модернизации и проектировании АСУ ТП доменных печей: № 9 «Криворожсталь», № 1 «Азовсталь», № 1 ЧерМК, № 3 ЗСМК, № 1 ММК, № 6 НТМК и других. Впервые в России и странах ближнего зарубежья безщитовой вариант компоновки центрального пульта управления был использован на доменной печи № 5 ОАО НЛМК. Необходимое для подобных систем дублирование контроля и управления обеспечивается размещением показывающих приборов и блоков ручного управления на специальных приборных приставках на пультах управления. Все новые и реконструируемые мощные отечественные и зарубежные печи оснащаются современными аналогичными многоуровневыми АСУ ТП. При этом базовые системы автоматизации оборудования, как правило, аппаратурой фирм Siemens, Allen Bradley, Omron и др.

При автоматизации доменных печей используется понятие рационального объема автоматизации. Под рациональным объемом автоматизации понимается объем средств и систем автоматического контроля и управления процессом, который соответствует современному состоянию развития технических средств и математического обеспечения и удовлетворяет требованиям технологии производства основной продукции [49—51]. Уровень автоматизации лучших доменных печей металлургических предприятий России и ближнего зарубежья составляет на печи № 5 ОАО «Северсталь» (объемом 5500 м<sup>3</sup>) 69,6 %; № 3 Западносибирского металлургического комбината (3000 м<sup>3</sup>) — 72,3 %; № 6 Новолипецкого металлургического комбината (3200 м<sup>3</sup>) — 69,7 % [27—30]. Сегодня численное значение этого показателя приближается на лучших доменных печах к 70—80 %, что свидетельствует об относительно высоком уровне автоматизации доменной плавки. Магнитогорский, Нижнетагильский, Карагандинский и ряд других металлургических комбинатов России и стран СНГ осуществляют оснащение мощных доменных печей информационно-управляющими системами на базе микропроцессорной техники.

Опыт работы лучших отечественных и зарубежных мощных доменных печей свидетельствует о том, что для выплавки качественного чугуна с минимальными затратами необходимо контролировать 500—800 характеристик входных и выходных параметров плавки, технологических параметров самого доменного процесса и работы оборудования печи, для чего используется более 3000 единиц аппаратуры [28, 29, 49—51]. Так, для контроля и управления доменной печью № 9 полезным объемом 5000 м<sup>3</sup> завода «Криворожсталь» используется около 6000 единиц аппаратуры. Большое количество контролируемых параметров требует свертки информации в обобщенные показатели входа, выхода и состояния доменного процесса.

В то же время следует отметить, что в целом, несмотря на быстрое расширение применения в мировой практике доменного производства вычислительной техники, масштабы использования современных компьютерных систем управления на доменных печах России и ближнего зарубежья остаются крайне ограниченными [32]. В настоящее время это связано главным образом не с экономической целесообразностью, а с общим недостатком капитальных вложений средств в реконструкцию и модернизацию действующих печей. Использование компьютерных систем контроля и управления сегодня экономически выгодно даже на доменных печах малого объема.

Заметим, что недостаточное общее количество измеряемых параметров работы доменных печей, низкая точность традиционно существующих измерений, ограничения по мощности, быстродействию и надежности вычислительной техники, особенно отечественного производства, являлись главными причинами малой эффективности АСУ ТП, внедряемых ранее на доменных печах. По этой же причине большое количество научно-исследовательских работ, имевших целью оптимизацию управления доменной плавкой с применением математического моделирования, не имело практической реализации в АСУ ТП и заканчивалось на этапе опытной эксплуатации или ограничивалось рекомендациями.

В последующие годы в АСУ ТП были использованы программные средства для визуализации технологического процесса с использованием человеко-машинного интерфейса для наблюдения и контроля за процессом со стороны технологического персонала, отслеживания и протоколирования аварийных ситуаций, архивирования данных:

- MMI (Man Machine Interface) — интерфейс человек-машина;
- SCADA (Supervisor Control And Data Acquisition) — программное обеспечение операторских станций технологических процессов.

Граница между программным обеспечением классов SCADA и MMI весьма условна, поэтому многие системы SCADA могут работать в качестве интерфейса для систем нижнего уровня.

Использование SCADA-систем позволило повысить возможности предоставления информации о ходе технологического процесса персоналу доменной печи и уменьшить количество регистрирующих приборов и контрольно-измерительных приборов почти с сотни единиц до полутора десятков, а в перспективе и полностью отказаться от них.

С развитием технических и программных средств изменяются и подходы к разработке систем АСУ ТП на крупных предприятиях. Система АСУ ТП представляется как ядро, отвечающее за сбор, первичную обработку и обмен информации с датчиков, преобразователей и исполнительных механизмов, и набор сервисных программ, отвечающих за организацию хранения, доступа и отображения информации пользователям системы. Высокая надежность средств вычислительной техники и программируемых логических контроллеров повысила отказоустойчивость АСУ ТП в целом. Это обстоятельство, а также возможность создания единого информационного пространства на базе локальной вычислительной сети внутри доменного цеха, приводит к необходимости интеграции систем АСУ ТП доменных печей с системами цехового уровня (системами АСУП). Таким образом, система АСУ ТП доменной печи становится базовой для решения задач учета и анализа производства доменной печи и цеха в целом, реализации систем оптимизации технологического процесса доменной плавки.

Развитие сетевой инфраструктуры внутри доменного цеха и интеграция ее в корпоративную сеть предприятия приводит к существенному росту количества пользователей системы как среди технологического персонала доменного цеха, так и корпоративных клиентов. Это ставит новые задачи по администрированию систем, организации защиты информации от несанкционированного доступа, защиты информации от вирусных атак.

Происходит внедрение корпоративных систем управления на крупных предприятиях России, расширяется функциональность и место системы АСУП доменного цеха. Так, в рамках внедре-

ния корпоративной информационной системы управления предприятием в доменном цехе вводятся в эксплуатацию такие системы, как система управления кадрами, система бухгалтерского учета, система учета затрат на производство, система планирования и учета затрат на ремонты и другие. Таким образом, система АСУП доменного цеха становится основным поставщиком оперативной и достоверной информации о производственной деятельности цеха в системы корпоративного уровня.

Развитие и совершенствование информационных функций АСУ ТП доменной плавки привело к необходимости создания, по сути, нового класса информационных систем — автоматизированных информационных систем технического обслуживания и управления (АИСТОУ). По своей сути и решаемым задачам сегодня АСУ ТП доменной печи можно отнести именно к этому классу, т. к. помимо традиционных информационно-управляющих функций существенная роль в силу специфики доменной плавки отводится следующим задачам:

- обнаружения аварийных ситуаций и выдачи необходимой сигнализации;
- диагностики оборудования, электронной архивации данных о состоянии оборудования, ведения архивов технологической информации, журналов событий;
- обеспечения удобного доступа персонала к оперативной и архивной информации, создания и документирования точных и других документов.

В АИСТОУ используют стандартные сетевые средства связи; желательно обеспечение программной совместимости с наиболее распространенными в нашей стране компьютерными платформами; предусмотрены значительные ресурсы в размерах буферов для хранения данных, имеются возможности расширения области применения пакетов, используемых для подключения новых подсистем и прикладных программ.

В соответствии с современной идеологией основные задачи управления решаются на нижних уровнях системы, что позволяет повысить реактивность системы и разгрузить вычислительную сеть от передачи излишней информации. На верхние уровни управления возлагаются только те задачи, для выполнения которых вычислительные средства нижних уровней не приспособлены.

АИСТОУ включает следующие основные подсистемы (блоки) (рис. 1.2) [17—19, 52]:



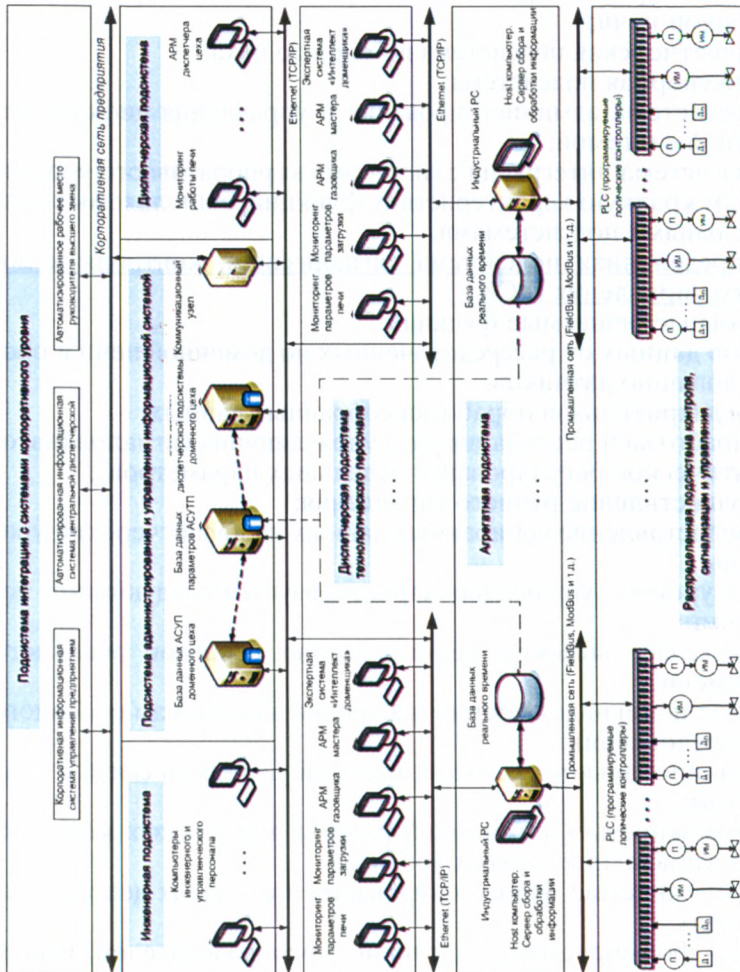


Рис. 1.2. Структурная схема автоматизированной информационной системы технического обслуживания и управления доменного цеха

- распределенная подсистема контроля, сигнализации и локального управления (РСКУ);
- агрегатная подсистема;
- диспетчерская подсистема технологического персонала доменной печи;
- диспетчерская подсистема доменного цеха;
- инженерная подсистема;
- подсистема администрирования и управления информационной системой;
- подсистема интеграции с системами корпоративного уровня.

Дадим краткую характеристику функций, выполняемых этими отдельными подсистемами.

#### Распределенная подсистема сигнализации, контроля и локального управления (РСКУ)

Основные решаемые функции:

- сбор данных от рассредоточенных по доменной печи и оборудованию датчиков;
- предварительная обработка собранных данных;
- выработка и реализация ряда управляющих сигналов (автоматическое регулирование отдельных параметров);
- осуществление ручного управления;
- предоставление собираемых данных на диспетчерский уровень.

Этот уровень управления характеризуется следующими показателями:

- предельно высокой реактивностью режимов реального времени;
- предельной надежностью (на уровне надежности основного оборудования);
- функциональной полнотой модулей устройств связи с объектом;
- возможностью автономной работы при отказах комплексов управления верхних уровней;
- возможностью функционирования в сложных цеховых условиях.

РСКУ формируется из датчиков, преобразователей, исполнительных механизмов, регулирующих органов и связанных с ними контроллеров. Поскольку перечисленные средства должны обеспечивать возможность построения локальных контуров управления, данный уровень должен работать в реальном времени. Время реакции систем, используемых в доменных печах, на

этом уровне не должно превышать нескольких десятков миллисекунд. Большие геометрические размеры агрегата, повышенные значения температур, загазованность, резкие перепады температуры окружающей среды, высокий уровень вибрации и другое предъявляют особые требования к надежности средств этого уровня.

Заметим, что для реализации задач этого уровня в промышленных системах существует в принципе два конкурирующих направления в технике: индустриальные (промышленные) компьютеры PC и программируемые логические контроллеры PLC.

Индустриальные (промышленные) компьютеры (PC), как правило, программно совместимы с обычными офисными PC компьютерами, но адаптированы для жестких условий промышленной эксплуатации. Они должны работать круглосуточно, подвергаясь воздействию окружающей среды: влаги, пыли, вибрации. В качестве устройств сопряжения с объектом управления данные системы комплектуются дополнительными платами (адаптерами) расширения, представленными на рынке в большом разнообразии. В качестве операционной системы в промышленных PC чаще всего применяется Windows 95/98/NT/2000/XP, в том числе различные расширения реального времени, специально разработанные для этой операционной системы Windows NT.

Промышленные логические контроллеры (PLC — Programmable Logic Controller) представляют собой специализированные вычислительные устройства, предназначенные для управления процессом (объектом) в реальном времени. Отметим современные тенденции построения программируемых логических контроллеров PLC:

- повышение интеллектуальных возможностей контроллера: увеличение производительности процессора и объема оперативной памяти, использование flash-памяти, выход в локальные сети (промышленные и офисные), применение многозадачных операционных систем реального времени (VxWorks, QNX, OS-9 и др.);
- возможность простой конфигурации каналов ввода-вывода;
- пылевлагозащитное, вибропрочное и ударопрочное исполнение;
- работа в широком диапазоне температур ( $-40 \dots +70$  °C);
- отсутствие механических устройств (накопителей на дисках, вентиляторов);

- приближение контроллеров к датчикам и исполнительным органам нижнего уровня автоматизации;
- возможность автономного выполнения задач обработки информации и управления при выходе из строя машин верхнего уровня.

Промышленные контроллеры имеют вычислительное ядро и модули ввода-вывода, принимающие информацию (сигналы) с датчиков, переключателей, преобразователей, других устройств и контроллеров и осуществляющие управление процессом или объектом выдачей управляющих сигналов на приводы, клапаны, переключатели и другие исполнительные устройства. Современные PLC часто объединяются в сеть, а программные средства, разрабатываемые для них, позволяют в удобной для оператора форме программировать и управлять ими через Host-компьютер, находящийся на более высоком уровне.

Много материалов и исследований по промышленной автоматизации посвящено конкуренции двух направлений.

Основная тенденция в создании современных автоматизированных информационных систем заключается в следующем: там, где требуется повышенная надежность и управление в реальном масштабе времени, применяют PLC, которые по сравнению с персональными компьютерами (PC) общего назначения более устойчивы к зависаниям, обладают детерминированностью поведения, детерминированными реакциями на события реального времени, не подвержены атакам программ-вирусов. PLC являются ответственными компонентами и, в значительной степени, определяют свойства всей информационной системы — открытость, модульность, наращиваемость, гибкость, надежность функционирования. Исследование рынка PLC показывает, что наиболее развитой архитектурой, программным обеспечением и функциональными возможностями обладают контроллеры Siemens, Allen Bradley, Fanuc Automation, Mitsubishi, SMART, IUC-9300, VME-9300, Omron, МИК, МФК и другие.

Заметим, однако, что реализация системы на основе оборудования и программных средств, поставляемых «под ключ» приборостроительными фирмами-гигантами, которые применяют собственную уникальную архитектуру измерительно-вычислительных комплексов (Siemens, Allen Bradley и ряд других), а в дальнейшем монополизировать ее сопровождение, ремонт и модернизацию, не всегда рациональна. Использование закрытых внутрифирменных стандартов, отсутствие исчерпывающей до-

кументации на нее и программные средства навсегда привязывает заказчика к фирме-поставщику и, в конечном счете, требует существенно больших, чем в любом другом варианте, суммарных затрат на создание и эксплуатацию информационных систем.

При этом необходимо обеспечение возможности работы PLC в автономном режиме в критических местах при отказе сети. В PLC загружаются программы и данные из компьютеров более высокого уровня, уставки, обеспечивающие координацию и управление агрегатом по критериям оптимальности управления технологическим процессом в целом, выполняется вывод на второй уровень управления служебной, диагностической и оперативной информации, т. е. данных о состоянии агрегата, технологического процесса.

Особенность обмена информацией между первым и вторым уровнями состоит в высокой степени регулярности. Необходимость обмена информацией в темпе реального процесса накладывает жесткие ограничения на этот режим. В связи с этим применяются промышленные сети.

Надежность оборудования, способного работать в тяжелых условиях эксплуатации, измеряется временем наработки на отказ, превышающим 100000 часов (свыше 10 лет) в непрерывном круглосуточном режиме эксплуатации.

Основными элементами РСКУ АИСТОУ являются подсистемы управления: шихтоподачей, дутьевым режимом и доменной печью.

*Подсистема управления шихтоподачей осуществляет:*

- автоматический контроль химического состава шихтовых материалов и их запасов в расходных бункерах бункерной эстакады;
- автоматическое управление процессом порционного дозирования (набор, хранение и выгрузка отдельных доз шихтовых материалов по каналам дозирования по заданной программе);
- адаптивную динамическую компенсацию контролируемых возмущений при дозировании шихтовых материалов;
- автоматическое управление формированием порций шихтовых материалов по заданной программе;
- управление загрузочным устройством;
- контроль уровня засыпи, скорости опускания шихты на ковшнике.

*Подсистема управления дутьевым режимом осуществляет:*

- контроль и регулирование основных параметров блока воз-духонагревателей;
- контроль давления и расхода холодного дутья, содержания в нем кислорода;
- регулирование соотношения расходов «природный газ — холодное дутье»;
- стабилизацию температуры и влажности горячего дутья;
- регулирование давления природного газа;
- управление распределением природного газа по фурмам до-менной печи и др.

*Подсистема управления доменной печью выполняет:*

- регулирование давления газа под колошником;
- контроль следующих параметров: температуры и состава колошникового газа, перепадов статического давления по высоте печи;
- контроль состава и температуры газов над (под) уровнем засыпи;
- контроль системы охлаждения и прогара фурм доменной печи;
- контроль температуры брони;
- контроль состава, температуры массы чугуна на выпуске и др.

#### Агрегатная подсистема

*Основные решаемые функции:*

- обработка данных, включая масштабирование;
- синхронизация работы подсистем;
- организация архивов по выбранным параметрам;
- резервирование каналов передачи данных;
- визуализация накопленной информации;
- расчет и выбор законов управления, настроек и уставок, со-ответствующих заданным показателям качества управле-ния и текущим (или прогнозным) параметрам объекта уп-равления;
- хранение и дистанционная загрузка управляющих программ в PLC;
- контроль работоспособности оборудования первого уровня, реконфигурация комплекса для выбранного режима работы;
- связь с третьим уровнем;
- обмен информацией с диспетчерским уровнем и подсисте-мами нижнего уровня;
- хранение данных.

Аппаратная база должна быть более мощной, предусматривающей возможность обмена через промышленные сети и сети общего назначения с нижним и верхним уровнем. Предусмотрена организация горизонтальных соединений с базами данных реального времени.

Диспетчерская подсистема технологического персонала  
доменной печи

Решает следующие задачи:

- оценка технологического состояния доменной печи;
- диагностика режима плавки;
- обнаружение аварийных ситуаций и необходимая сигнализация;
- ведение технологических архивов и журналов событий;
- визуализация технологического процесса, текущих и архивных данных, просмотр журналов;
- компьютерная поддержка принятия решений диспетчерского уровня;
- диспетчерское управление.

Диспетчерский уровень образуют несколько (в зависимости от полноты и сложности решаемых задач) персональных компьютеров, расположенных в помещении главного щита контроля и управления доменной печью и образующих автоматизированные рабочие места оперативного персонала доменной печи. При этом используются, чаще всего, промышленные компьютеры PC, обычно ОС общего назначения Windows 98/NT/2000, технологии Internet/Intranet.

Дадим краткую характеристику основных подсистем диспетчерского уровня технологического персонала доменной печи.

Подсистема централизованного контроля хода  
технологического процесса и состояния оборудования  
(АРМ оператора печи — газовщика)

Включает в себя ряд подсистем более низкого ранга.

*Подсистема отображения технологической информации.*  
Предназначена для своевременного обеспечения сменного технологического персонала оперативной информацией о доменном процессе в удобной для пользователя форме. В автоматизированной системе интерфейс связи человека (оператора) с компьютером приобретает особое значение. Двойное назначение этого интерфейса предъявляет к нему требования обеспечения легкого и быстрого восприятия информации человеком, за которым остается «последнее слово» в принятии решения, а также

быстрый и безошибочный ввод человеком информации в компьютер. Задача построения графического интерфейса достаточно сложна. Необходимо учитывать множество факторов, в частности структуру имеющихся подсистем, объем и типы собираемой информации, профессиональные навыки и уровень компьютерной подготовки персонала, сложность решаемых задач и т. п.

Общение с компьютером специалиста-доменщика (мастера, газовщика и т. п.), не подготовленного специально для работы на компьютере, представляет серьезные трудности. Для этих целей предусматриваются специальные программные средства общения человека с компьютером, не требующие специальных знаний в области программирования. Поскольку АРМ работает под управлением ОС Windows, то в основу пользовательского интерфейса заложены аналогичные диалоговые элементы: окна, строковые опускающиеся меню, панели инструментов и т. д. Кроме этого, в АРМ имеется встроенная справочная система, для минимизации ручного ввода служат специальные значения, принимаемые по умолчанию. Достигнутая в результате эргономичность пользовательского интерфейса облегчает эксплуатацию АРМ и значительно сокращает этап обучения персонала. Свойства любого параметра можно узнать из соответствующего информационного окна, где отображаются название параметра, контролируемая подсистема, точность измерения и т. д.

*Подсистема обработки жидких продуктов плавки.* Предназначена для просмотра и редактирования информации о поставках ковшей и миксеров под печь, а также информации о выпуске жидких продуктов плавки.

*Подсистема шихтоподачи.* Предназначена для просмотра и редактирования информации о ходе загрузки, работе засыпного устройства, количестве подач в смену, системе загрузки, а также информации о расходах железорудных материалов, кокса и флюсов в подаче и т. п.

*Подсистема представления отчетных данных (электронный рапорт).* Предназначена для формирования, хранения и получения твердых копий отчетно-технологической информации о работе комплекса доменной печи по заранее согласованной с руководством цеха форме: вычисление усредненных за заданные интервалы времени (час, смена, сутки) значений параметров плавки; формирование и выдача на экран монитора по запросу сменного технологического персонала справочных форм сменно-суточной отчетности о работе печи от начала смены на текущий момент времени или за предыдущие смены.



*Подсистема формирования предупредительных сообщений.* Предназначена для обнаружения отклонений важнейших параметров процесса и наиболее ответственных элементов системы охлаждения печи от их нормального состояния и своевременно информирования об этом сменного технологического персонала в виде соответствующих предупредительных сообщений. Отклонение контролируемых параметров (например, верхнего и нижнего перепадов давления по высоте печи, температур периферийных термопар и в газоотводах, перепадов температуры охлаждающей воды на леточных горновых и верхних холодильниках лещади) от их нормального состояния определяется по выходу их текущих величин за заданные пределы.

*Подсистема диагностики технологического состояния печи и управления (АРМ мастера доменной печи)*

Включает ряд подсистем.

*Подсистема оценки и прогноза теплового состояния доменной печи.* Предназначена для оценки текущих и прогнозирования будущих показателей производительности печи, температуры чугуна и содержания кремния, удельного расхода и минимально возможного расхода (резерва) кокса, а также диагностики отклонений от нормального режима плавки по нагреву и развитию тепло- и массообменных процессов. Позволяет рассчитывать корректировку массы кокса и флюсующих материалов в подаче при изменении соотношения железорудных компонентов, состава кокса, параметров комбинированного дутья, химического состава чугуна.

*Подсистема оценки дутьевого, газодинамического режимов и ровности хода доменной печи.* Система предназначена для стабилизации ровности хода доменной печи, предотвращения аномальных и критических состояний, оценки и планирования газодинамического резерва. К числу критериев устойчивости хода доменной печи относятся интенсивность плавки по коксу (суммарному углероду), газодинамическая устойчивость слоя. Газодинамический резерв контролируется по разности предельно допустимого и фактического перепадов давления газа в шахте. Подсистема позволяет также определять геометрические размеры фурменного очага, оценивает также ход печи (ровность хода печи, развитие канального и периферийного ходов и т. п.).

*Подсистема контроля и управления шлаковым режимом.* Предназначена для оценки шлакового режима и вязкопластиче-

ского состояния шихты и обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет массы железорудных материалов, флюсов и кокса в подаче для получения шлака с заданными свойствами (вязкости, текучести, десульфурирующей способности и т. д.);
- расчет шихты на заданные показатели, оценка газодинамической напряженности работы низа печи.

В АРМ мастера должно быть предусмотрено широкое использование математических моделей. Заметим, в связи с этим, что анализ в целом состояния вопроса по реально используемым математическим моделям в практике технологии ведения доменной плавки показывает: в настоящее время разрыв между потенциальными возможностями средств автоматизации и реальными возможностями используемого программного обеспечения огромен. Поэтому первостепенной задачей, по мнению ведущих отечественных и зарубежных специалистов, является создание эффективного математического обеспечения решения технологических задач доменной плавки.

Основное внимание при этом направлено на решение следующих задач:

- оценка, прогноз и регулирование теплового состояния доменной печи в целях уменьшения расхода кокса и получения стабильного качества чугуна по физическому нагреву и химическому составу;
- оценка, прогноз и регулирование дутьевого и газодинамического режимов доменной плавки;
- оценка, прогноз и регулирование состояния зоны плавления, размягчения и шлакообразования как лимитирующей распределение газов и возможности интенсификации плавки.

Именно на этих вопросах и остановимся более подробно в дальнейшем.

*Подсистема «Эксперт».* Эта экспертная система на базе искусственного интеллекта позволяет решать ряд технологических задач прогнозирования расстройств хода печей и предоставляет возможность принятия в нештатных ситуациях быстрых и достоверных решений в условиях неполноты и противоречивости информации.

Диспетчерский уровень доменного цеха (АРМ диспетчера цеха)  
Решает следующие основные задачи:

- контроль за работой доменных печей, ввод информации о причинах отклонений в ходе технологического процесса,

принятия оперативных организационно-технических мер для устранения выявленных отклонений;

- просмотр информации о потребителях и производстве чугуна (наливе и сливе);
- ввод и просмотр информации о движении ковшей и миксеров;
- текущий химический анализ состава окатышей, агломерата, кокса и средний анализ шихты за смену;
- расчет расходов шихтовых материалов и показателей работы печей и цеха;
- химические анализы состава чугуна и шлака и состава колошникового газа;
- обмен оперативной информацией о состоянии доменных печей и производственных показателях доменного цеха с автоматизированной информационной системой центральной диспетчерской предприятия.

Обычно используются РС-совместимый компьютер под управлением операционной системы Windows 98/NT/2000/XP.

#### Инженерный уровень

Вырабатывает стратегию управления технологией доменного цеха. Применяются компьютеры РС-совместимой архитектуры, ОС Windows 98/NT/2000/XP, технологии Internet/Intranet. Инженерный уровень включает компьютеры инженерного и управленческого персонала доменного цеха и осуществляет:

- предоставление информации со всех доменных печей для просмотра инженерно-техническим и управленческим персоналом;
- визуализацию, архивирование и документирование технологической информации, используемой на инженерном уровне;
- решение комплекса инженерных задач в области стратегии управления доменной плавки, в частности анализ возможных режимов плавки при изменении свойств поступающего железорудного сырья и кокса, распределение имеющихся ресурсов между отдельными доменными печами и т. п.;
- решение этих задач на данном уровне управления, что обеспечивает оптимизацию управления ресурсами цеха как единого организационно-технологического комплекса по заданиям, поступающим с верхнего уровня, и при оперативном учете текущих параметров, определяющих состояние объекта управления.

Задачи, решаемые на этом уровне, в аспекте требований, предъявляемых к компьютерам, отличаются главным образом повышенными требованиями к ресурсам. Требуется, как правило, ведение единой интегрированной — централизованной или распределенной, однородной или неоднородной баз данных, планирования и диспетчирования на уровне цеха в целом, автоматизации обработки информации в основных и вспомогательных административно-хозяйственных подразделениях цеха: бухгалтерский учет, материально техническое снабжение и т. п. Для решения этих задач выбирают универсальные компьютеры, а также многопроцессорные системы повышенной производительности.

#### Подсистема администрирования и управления информационной системой

Актуальность создания подобной системы обусловлена необходимостью хранения и управления большим количеством информации, интеграцией локальной сети доменного цеха в единое информационное пространство комбината, высокой степенью концентрации технических и программных средств информационных систем. Этот уровень предназначен:

- для создания и ведения базы данных. Включает в себя систему управления базой данных как отдельных доменных печей, так и всего цеха в целом;
- обеспечения функционирования локальной сети доменного цеха и интеграции ее в корпоративную сеть комбината;
- обеспечения защиты информации от несанкционированного доступа;
- обеспечения антивирусной защиты систем;
- инвентаризации технических и программных средств пользователей корпоративной сети;
- оценки состояния технических и программных средств информатизации.

Система обеспечивает, в частности, выдачу оперативных сообщений о нарушениях и сбоях, возникающих в процессе работы информационной системы; ведение информационной базы и накопление данных по сбоям, отказам и перезапускам систем; формирование и выдачу по запросу персонала документов, характеризующих качество функционирования системы.

## 1.2. Пример реализации АСУ ТП доменной плавкой на ОАО ММК

Рассмотрим построение современной автоматизированной системы на примере печи № 7 доменного цеха ОАО ММК, схема которой представлена на рис. 1.3.

### Распределенная подсистема контроля и локального управления (РСКУ)

Входная информация о работе каждой доменной печи разделена на блоки.

1. Параметры, требующие периодичности опроса 2—5 секунд (критические параметры), такие как анализ схода шихтовых материалов, время срабатывания подач, перепады давления по высоте печи, давление колошникового газа, горячего дутья, работа ВРШ, дискретные сигналы и т. д.

2. Блок остальных входных данных, автоматически контролируемых непосредственно на печи: анализ состава колошникового газа, температуры периферийных термопар, колошникового газа по газоотводам, влажность, температура, расход и состав горячего дутья, расходы природного газа и технологического кислорода, расходы кокса и железорудных материалов и т. п.

Периодичность опроса состояния этих автоматически контролируемых параметров составляет 30—60 секунд.

3. Автоматический или полуавтоматический ввод контролируемых данных в ПК индустриального исполнения Pentium 200 рабочего места газовщика: химический состав железорудного сырья, его механическая прочность, содержание мелочи; технический состав кокса, его прочность; состав жидких продуктов плавки, график выпусков жидких продуктов плавки и т. п.

Данные в АСУ «Контроль за поступлением сырья в доменный цех» поступают из трех источников: по привозному сырью — по электронной почте сертификаты с Соколовско-Сарбаевского ГОКа, по местному сырью — с АСУ «Учет поступления и движения сырья на складах ЦПАШ» (цех подготовки аглошихты), по агломерату — с АСУ «Контроль работы аглофабрик». Поступающая из АСУ «Контроль за поступлением сырья в доменный цех» информация о химическом составе и физических свойствах очередной партии сырья, а также информация о результатах химического анализа чугуна и шлака обновляется по мере ее поступления.

# Структурная схема комплекса программно-технических средств доменной печи №7

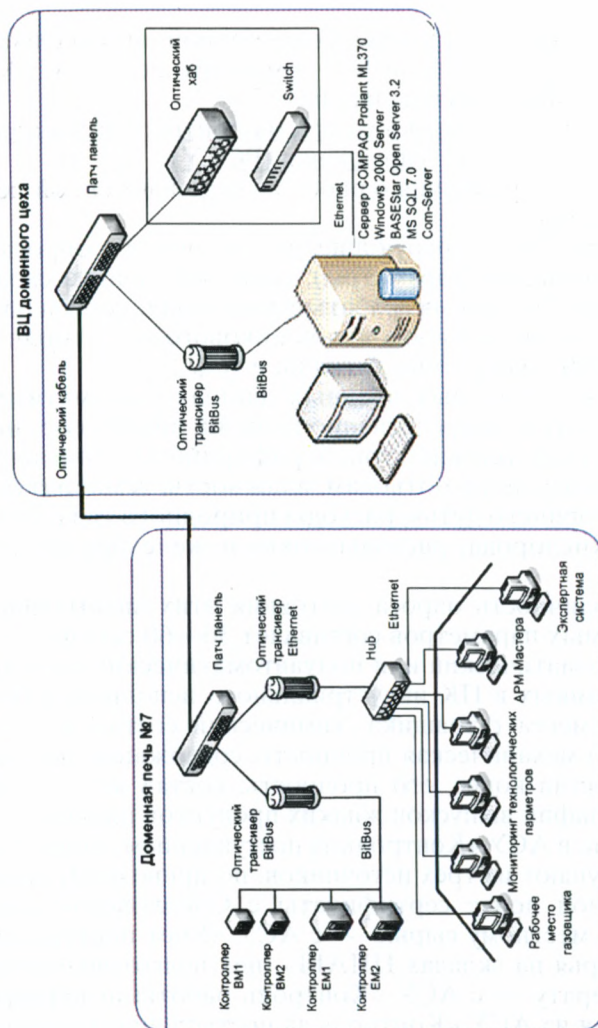


Рис. 1.3. Структурная схема комплекса программно-технических средств ДП №7

Уровень РСКУ АИСТОУ оснащен продукцией отечественных производителей. В частности, на этом уровне применяются отечественные промышленные контроллеры МИК (разработчики — Институт электронных управляющих машин, ТОО «Электронмашсистем» и кафедра автоматики МИФИ, г. Москва). Они предназначены для построения распределенных информационных систем, использующих промышленные сети типа ВITbus (стандарт фирмы Intel) (рис. 1.4). В состав технических средств МИК входят программируемый логический контроллер МИК СМ9107 и широкий набор модулей УСО. Программное обеспечение МИК построено на основе коммерческой версии пакета МIK\$Sys (МИКСИС).

На верхнем уровне иерархии используется классическая для промышленных систем схема host (хозяин) — компьютер, в качестве которого используется персональный компьютер индустриального исполнения Pentium 233, и множество подчиненных PLC, что обеспечивает на различных уровнях аппаратную и программную совместимость МИК с другими системами. Опыт эксплуатации контроллеров МИК подтверждает их достаточную надежность, удобство применения и использования имеющегося для них программного обеспечения. В качестве РС для сбора и первичной обработки параметров доменного процесса и системы загрузки используется Pentium 233 с оперативной памятью 32 Мбайта и емкостью жесткого диска 6.4 Гбайта.

Программное обеспечение МIK\$Sys построено на основе коммерческой версии пакета МIK\$Sys. В состав программного обеспечения входят:

- встроенная ОС, поддерживающая до 8 задач в реальном масштабе времени;
- сетевой пакет, обеспечивающий связь удаленных узлов с ПЭВМ;
- система разработки и поддержки графического интерфейса оператора на ПЭВМ (SCADA-система);
- система организации многозадачного режима работы в реальном времени на ПЭВМ;
- программное и алгоритмическое обеспечение первичной обработки информации фильтрации входных данных;
- программное и алгоритмическое обеспечение цифрового управления и регулирования, текущей идентификации параметров объектов управления и оптимальной настройки параметров регуляторов;

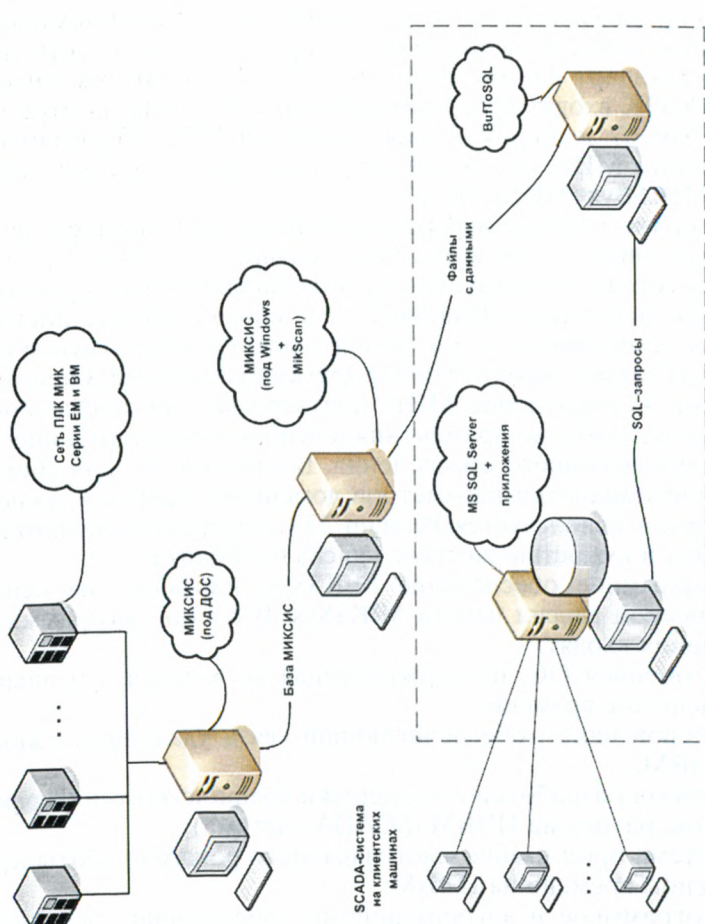


Рис. 1.4. Схема реализации АСУ ТП на базе МИКСИС



- программное обеспечение компактных быстродействующих релейных СУБД для управления данными на диске и в ОЗУ;
- программное и алгоритмическое обеспечение моделирования тепловых, гидравлических и других динамических объектов в реальном масштабе времени.

Концентратор (hub) Ethernet имеет порт AUI для подключения внешнего трансивера. К этому порту подключен трансивер, работающий на оптоволокно. С помощью этого трансивера концентратор подключается к магистральному кабелю, соединяющему несколько концентраторов между собой, кроме того, обеспечивается подключение станции, удаленной от концентратора более чем на 100 м.

Протокол VITbus разработан фирмой Intel для построения распределенных систем, в которых должны быть обеспечены высокая скорость передачи и надежность. Структура информационного пакета VITbus проста, поэтому этот протокол не дает возможности построения сложных систем и не требует больших аппаратных затрат на его реализацию.

На основе VITbus можно построить системы двух конфигураций: одноуровневой и многоуровневой. Использование многоуровневой сетевой структуры оправдано тогда, когда необходимо состыковать несколько VITbus-сетей, использующих различные скорости передачи данных.

Информационный обмен организован по принципу «запрос (MASTER) — ответ (SLAVE)». Функции MASTER-узла концентрируются только в одном узле и распределяются по нескольким MASTER-узлам. В этом случае необходима организация механизма передачи маркера (права доступа к шине) от одного MASTER-узла к другому.

Протокол VITbus определяет два режима передачи данных по шине:

1. *Синхронный режим.* Этот режим используется для работы на больших скоростях передачи данных, но на ограниченных расстояниях. В этом случае топология сети может включать до 28 узлов, а длина шины ограничивается 30 м. Скорость передачи изменяется от 500 до 2400 кбод. Синхронный режим передачи предполагает использование двух дифференциальных сигнальных пар: одной — для данных, другой — для синхронизации.

2. *Режим с самосинхронизацией.* Использование этого режима позволяет значительно уделить шину. Стандартом опреде-

ляются две скорости передачи: 375 кбод (до 300 м) и 62,5 кбод (до 1200 м). Используя репитеры (повторители), можно объединить последовательно несколько шинных сегментов (до 28 узлов на сегменте). Тогда общее число узлов можно довести до 250, длину общей шины — до нескольких километров. При этом режиме используются две дифференциальные пары: одна — для данных и одна — для управления репитером.

#### Диспетчерский уровень доменной печи

Для реализации диспетчерского уровня на доменной печи № 7 впервые центром АСУ комбината были разработаны и внедрены:

- *система управления технологическим процессом с частичной заменой вторичных приборов на компьютерную систему мониторинга технологических параметров доменной печи;*
- *система мониторинга параметров систем загрузки доменных печей.*

Главными функциями этих, по сути дела, SCADA-систем являются отображение технологического процесса в виде мнемосхем на экране монитора компьютера, сигнализация об аварийных ситуациях, обеспечение компьютерного общего управления процессом со стороны оператора-технолога, возможность создания архивов аварий, событий и поведения переменных процесса во времени (тренды), а также полное или выборочное хранение параметров процесса через заданные промежутки времени постоянно или по условию и др.

Компьютеры этого уровня решают следующие задачи:

- диспетчерского сбора, сигнализации управления и отображения всего технологического процесса или его отдельных подсистем (SCADA-системы), реализованные на операторских станциях;
- хранения технологической информации в базе данных;
- компьютерной поддержки принятия решений (комплекс математических моделей технологического процесса, интеллектуальная поддержка принятия решений), реализованной на расчетных станциях;
- интеграции локальной сети в корпоративную сеть всего предприятия (коммуникационный сервер).

SCADA-система МИКСИС является одной из лучших и надежных на сегодняшний день систем такого класса. Но, как любое программное обеспечение, данная SCADA-система не лишена недостатков, которые не позволяют использовать ее для построения полномасштабных распределенных систем АСУ ТП.

Так, для решения вопросов интеграции между подсистемами, реализованными на базе SCADA-системы МИКСИС, пришлось приложить немало усилий, чтобы организовать просмотр технологических параметров с любого компьютера корпоративной сети и обеспечить возможность внедрения математических моделей технологических процессов. К тому же данное программное обеспечение работает с памятью контроллера напрямую. Учитывая то, что в МИКСИСе реализована возможность подключения программ, разработанных с помощью языка программирования Фортран, на разработчика возлагается полная ответственность на корректность работы всего программно-технического комплекса.

В качестве средства для решения указанных проблем было предложено использовать программный продукт фирмы COMPAQ BASEstar Open Server, основное назначение которого — разработка систем АСУ реального времени, в частности АСУ ТП, а также решение вопросов интеграции как систем АСУ ТП, построенных на различной технической платформе, так и интеграции систем АСУ ТП и АСУП. Необходимость разработки систем с использованием программного продукта BASEstar Open Server обусловлена следующими причинами:

*Во-первых*, разработанное программное обеспечение по пересылке данных из базы МИКСИС основано на передаче информации в виде структурированного файла и его дальнейшей обработке и записи в базу MS SQL Server. Это приводит к возможным сбоям в обработке файлов, накладывает дополнительную нагрузку на дисковую и операционную системы и, как следствие, приводит к задержкам в системе отображения.

*Во-вторых*, данная реализация имеет одностороннюю связь, то есть существует возможность только сбора информации из МИКСИСа и вывода ее на экран монитора. Обратная связь (управление объектом) в данной реализации невозможна.

*В-третьих*, до недавнего времени SCADA-система МИКСИС была единственным средством, которое позволяло бы программировать контроллеры. Сегодня, благодаря взаимодействию со специалистами НВК «ВИСТ» и «Электронмашсистем», был создан комплекс программных продуктов GX2000, позволяющий осуществлять операции по тестированию и программированию любого типа контроллеров из серии МИК и использовать драйвер для работы с BASEstar.

*В-четвертых*, на ряде перспективных объектов используют другие типы контроллеров. У же сейчас руководством этих це-

хов ставится задача объединения локальных подсистем АСУ ТП, функционирующих в данных подразделениях, в единую цеховую систему. Использование пакета BASEstar позволило максимально быстро это сделать.

*В-пятых*, учитывая, что на ОАО ММК широко развита система доступа к информации с использованием технологии Intranet, появилась необходимость распространить возможности данной технологии и на задачи АСУ ТП.

*В-шестых*, на ОАО ММК проводится внедрение корпоративной системы управления предприятием на базе Oracle Application. Учитывая, что в системе BASEstar есть средства, позволяющие взаимодействовать с базой данных Oracle, появилась возможность интеграции цеховых систем в систему Oracle Application.

Изначально была закуплена версия 3.1 этого продукта. При изучении данной версии, при всех преимуществах, получаемых от применения BASEstar, были выявлены и ряд недостатков.

Во-первых, для реализации системы, например, на одной из доменных печей затраты на базовое программное обеспечение (одна лицензия BASEstar Open Server Run Time, минимум 12 лицензий BASEstar Client) составляли приличную сумму.

Во-вторых, в версии 3.1 крайне неудобна схема лицензирования для клиентов, когда software key жестко привязывается к идентификатору машины. В связи с этим была предложена схема реализации системы АСУ на базе программного обеспечения BASEstar, состоящая из следующих программных компонентов:

- от разработчиков контроллеров: GX2000 программное обеспечение для программирования контроллеров и драйвер контроллера для BASEstar;
- от фирмы COMPAQ: BASEstar Open Server, BASEstar Client;
- собственные разработки: COM Server BASEstar, SCADA-система;
- база данных: MS SQL Server 7.0.

Таким образом, приведенная выше схема АСУ ТП упростилась до следующего вида (рис. 1.5).

Данный набор программного обеспечения позволяет построить достаточно гибкую и распределенную систему АСУ на базе программного продукта BASEstar.

Удалось уйти от файловой передачи и существенно сократить количество промежуточных звеньев, что существенно повысило надежность системы. При наличии сетевой платы BitBus

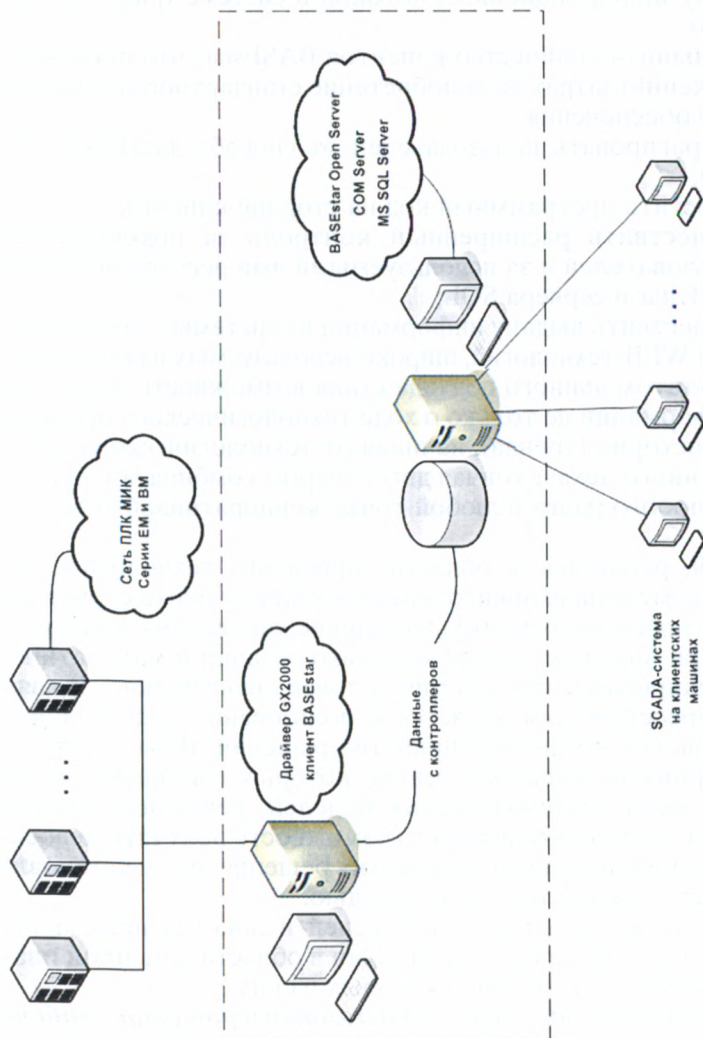


Рис. 1.5. Схема реализации АСУ ТП на базе BASEstar

с интерфейсом PCI имеется возможность разместить все программное обеспечение системы на одном мощном сервере.

Использование COM-технологий дало возможность изменить схему информационных потоков в системе (рис. 1.6). Это позволило:

- уменьшить количество клиентов BASEstar, что приводит к снижению затрат на приобретение стандартного программного обеспечения;
- абстрагировать пользователей от способа доступа к данным;
- упростить программный код на стороне клиента;
- осуществить расширенный контроль за подключением пользователей и за используемыми ими ресурсами сервера BASEstar и сервера SQL;
- осуществить выдачу информации из системы с использованием WEB-технологий, широко используемых на комбинате.

Результатом данного подхода стала возможность предоставления информации не только о ходе технологического процесса, но и о ее истории (тренда), начиная от технологического персонала доменного цеха и кончая диспетчером комбината и руководителем любого ранга в любой точке корпоративной сети комбината.

Задачи, решаемые в области управления технологическим режимом доменной плавки, относятся к классу плохо структурированных задач, поэтому осуществление управления технологией даже при высоком уровне компьютеризации и математического моделирования без участия человека невозможно. В связи с этим перспективным является использование информационных технологий поддержки принятия решений. В системах поддержки принятия решений, основу которых составляет целый комплекс (база) математических моделей, решающих различные задачи, пользователь имеет возможность получить недостающую ему информацию для принятия решения путем установления диалога с математической моделью.

Комплекс математических моделей и пакетов прикладных программ позволяет решать ряд задач в области доменной плавки. Остановимся только на некоторых из них.

**Интегрированный пакет «Автоматизированное рабочее место газопищика доменной печи»**

Пакет позволяет решать задачи ввода и редактирования информации:

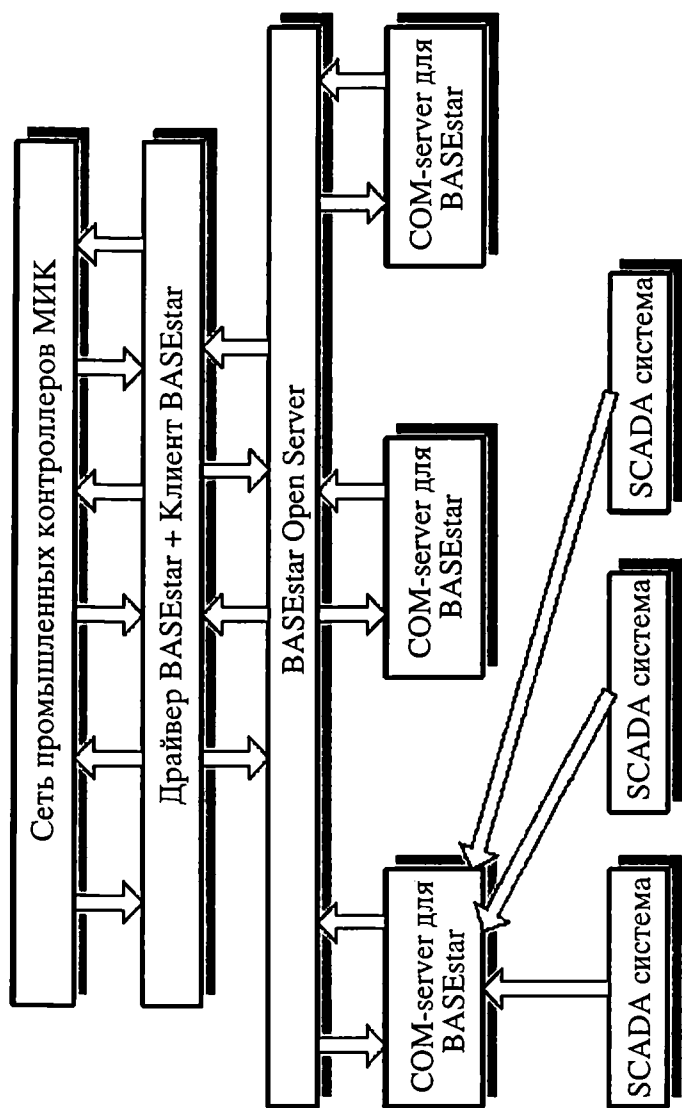


Рис. 1.6. Схема информационных потоков при использовании COM-технологии

- о выпуске чугуна и шлака — просмотреть и отредактировать информацию о постанковках ковшей и миксеров под печь, а также информацию о выпуске жидких продуктов плавки;
- шихтоподаче — просмотреть и отредактировать информацию о количестве подач в смену;
- системах загрузки доменной печи — просмотреть и отредактировать информацию о системе загрузки, а также информацию о расходах железорудных материалов, кокса и флюсов в подаче.

Пакет обеспечивает расчет и просмотр следующих документов: химический состав загружаемых материалов и жидких продуктов плавки, технологические и технико-экономические показатели работы печи (рис. 1.7).

В качестве РС автоматизированного рабочего места газовщика применяется персональный компьютер индустриального исполнения Pentium 200 с оперативной памятью 32 Мбайта и емкостью жесткого диска 4 Гбайта, ОС Windows NT/2000/XP. В ка-

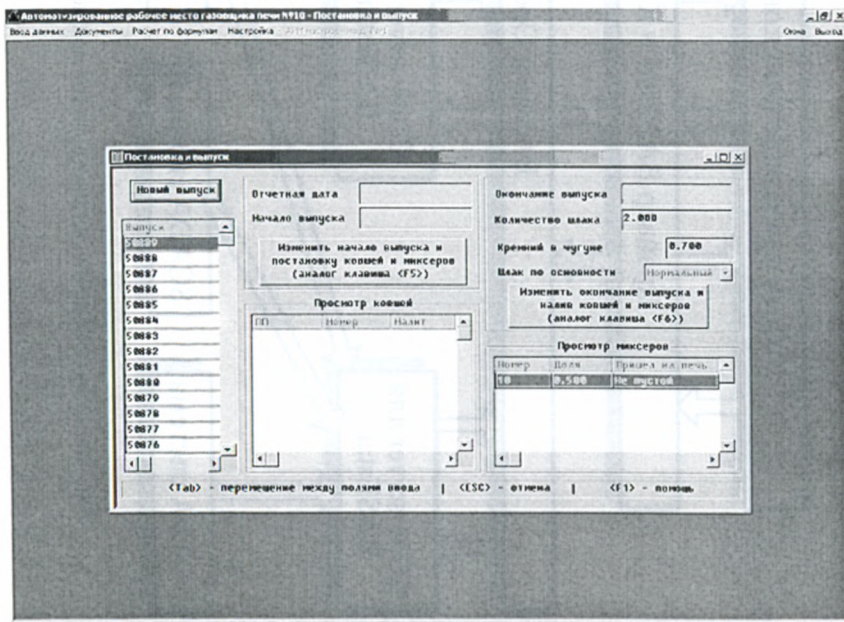


Рис. 1.7. Пример отображения информации АРМ-газовщика



честве средств разработки прикладных программ использован Microsoft Visual C++.

**Интегрированный пакет «Автоматизированное рабочее место мастера доменной печи»**

Пакет программы находится на стадии опытно-промышленного внедрения и должен решать задачи коррекции:

- массы кокса и флюсующих материалов в подаче при изменении соотношения железорудных компонентов, а также состава кокса;
- массы железорудных материалов и кокса в подаче для получения шлака заданных свойств;
- массы флюсующих материалов и кокса в подаче для получения заданного химического состава чугуна;
- массы кокса в подаче при изменении параметров комбинированного дутья (температуры и влажности дутья, расходов природного газа и технологического кислорода);
- прогноза изменения показателей доменной печи при изменении параметров плавки (параметров комбинированного дутья, характеристик загружаемого сырья и т. п.).

**Экспертная система для диагностики и регулирования хода доменной печи** (Разработка научно-инженерного центра Ассоциации содействия Всемирной лаборатории, г. Москва) [53, 54].

Позволяет осуществлять:

- диагностику нарушений хода доменной печи;
- диагностику нарушений теплового режима.

Система содержит два модуля, которые используются для определения:

- причин (факторов), вызывающих соответствующие нарушения хода печи;
- причин (факторов), вызывающих соответствующие нарушения теплового режима доменной плавки.

Экспертная система реализована на персональном компьютере индустриального исполнения Pentium 200 с оперативной памятью 32 Мбайта и емкостью жесткого диска 4 Гбайта, ОС Windows NT/2000/XP, а в качестве средств разработки программ использован Microsoft Visual C++.

#### Инженерный уровень

**Пакет «Решение технологических задач доменной плавки»** предназначен для технологического персонала доменного цеха. Он должен включать в себя три функционально связанных модуля, выполняющих:

- оценку базового (фактического) состояния доменного процесса;
- сопоставительный анализ работы доменных печей в различные периоды;
- прогноз изменения показателей доменной печи при изменении параметров плавки.

***Пакет «Оптимизация работы доменного цеха»***

Этот пакет находится на стадии разработки. Цель его работы — определять оптимальные значения параметров комбинированного дутья: расходы кислорода и природного газа на каждой из печей цеха при остановке отдельных печей цеха, изменении расходов природного газа, кислорода, состава и качества шихтовых материалов, поступающих в цех в различных технологических ситуациях работы цеха (максимум производства чугуна, минимум расхода кокса по цеху и т. п.). В модели учитываются ограничивающие и лимитирующие факторы по газо-гидродинамическим, тепломассообменным процессам на каждой из печей цеха, конъюнктура рынка.

***Пакет «Расчет состава агломерата для получения заданных свойств шлака»***

В настоящее время этот пакет прикладных вычислительных программ находится в разработке. В перспективе он должен осуществлять расчеты, связанные как с определением объема производимого агломерата на аглофабриках, так и состава этого агломерата, исходя из характеристик имеющихся привозных железорудных материалов при условии получения надлежащих свойств шлака (вязкости, температуры плавления, обессеривающей способности) и обеспечения рациональных технико-экономических показателей доменной плавки.

**Подсистема координации и управления информационной системой**

В настоящее время с использованием реляционной модели данных сформирована база данных доменного цеха, отражающая работу всех доменных печей по количеству и качеству выпускаемой продукции, количеству и качеству проплавляемых шихтовых материалов, потреблению энергоносителей, основным технологическим параметрам доменной плавки. Для хранения данных о работе доменной печи в этой сети на сервере базы данных установлена система управления базами данных Microsoft SQL Server. В качестве сервера базы данных используется Pentium II с оперативной памятью 256 Мбайт и емкостью

жесткого диска 6,4 Гбайта. Это позволило практически полностью решить в доменном цехе проблемы хранения, контроля, защиты, ввода, редактирования и извлечения информации, а также формирования необходимых отчетных данных.

Создание локальных компьютерных сетей для отдельных печей по архитектуре клиент-сервер, объединение их в распределенную компьютерную сеть всего доменного цеха с выходом последней в корпоративную компьютерную сеть ОАО ММК обеспечили единое информационное пространство и взаимосвязь с другими цехами и службами комбината, а также подсистемами цехов и производств. В качестве операционной системы для локальных сетей доменного цеха и отдельных печей хорошо себя зарекомендовала операционная система Microsoft Windows NT Server 4.0, а в качестве физической передающей среды широко используются экранированная витая пара и волоконно-оптический кабель. Выход сети доменного цеха в корпоративную сеть комбината осуществляется по двум дублирующим друг друга каналам. Основной — по беспроводной технологии, базируется на использовании радиоканала на частоте 2,4 ГГц и устройства организации радиосети ARLAN фирмы Aironet Wireless Communications, Inc., позволяющей обеспечивать скорость передачи данных 2 Мбит/с. Второй — проводной, использует выделенный двухжильный канал, основанный на использовании высокоскоростных модемов Megabit Modem 768 фирмы PairGain Technologies, Inc. и позволяющий достигать скорости передачи данных 768 кбит/с. Следует особо отметить, что в настоящее время даже в локальных, распределенных сетях и корпоративной сети на комбинате широко используется Intranet (внутренняя сеть)-технология, что позволило широко использовать надежные, удобные технологии и программное обеспечение глобальной сети Internet.

Проведенные мероприятия позволили организовать контроль и управление технологическим процессом на всех этапах — от складирования сырья в цехе подготовки агломерационной шихты до выплавки чугуна. Сегодня автоматизированная информационная система доменного цеха тесно связана с другими информационными системами, в первую очередь с теми, от которых зависит качество выплавляемого чугуна: цеха подготовки агломерационной шихты, агломерационного цеха, коксохимического производства, кислородно-конвертерного цеха, железнородного транспорта, кислородно-компрессорного производства и др.

Таким образом, задачи создания локальных систем автоматического управления, а также систем сбора и обработки информации, по крайней мере, на современных производствах в значительной степени решены. Однако в условиях изменяющихся свойств исходных шихтовых материалов, гибкого переналаживаемого производства с учетом сложности протекающих в доменных печах процессов технологическому персоналу часто весьма трудно обеспечивать нормальное, соответствующее технологическим инструкциям протекание доменного процесса.

В связи с этим особое место в современных АСУ ТП отводится модельным системам поддержки принятия решений. Рассмотрим состояние вопроса в этой области.

### **1.3. Состояние вопроса в области математического моделирования доменного процесса**

Современные методики анализа процессов доменной плавки базируются на достижениях многих отраслей науки и техники. Блестящей плеядой советских ученых, среди которых особо следует отметить И.П. Бардина, Е.Ф. Вегмана, В.Г. Воскобойникова, А.Д. Готлиба, В.К. Грузинова, Б.Н. Жеребина, Б.И. Китаева, Н.И. Красавцева, З.И. Некрасова, М.А. Павлова, А.Н. Похвиснева, А.Н. Рамма, И.А. Соколова, В.А. Сорокина, М.А. Стефановича, С.В. Шаврина, Ю.С. Юсфина, Ю.Г. Ярошенко и другими сформулированы основные положения теории доменной плавки.

Развитие этих положений на основе как математического, физического моделирования, так и экспериментальных исследований, выполнено В.П. Авдеевым, В.Н. Андроновым, Н.Н. Бабарыкиным, И.Д. Балоном, Б.А. Боковиковым, В.И. Большаковым, А.В. Бородулиным, Г.А. Воловиком, А.А. Гиммельфарбом, А.Н. Дмитриевым, В.А. Доброскоком, В.Г. Дружковым, Г.Г. Ефименко, С.А. Загайновым, Н.Н. Изюмским, В.К. Кропотовым, И.Ф. Куруновым, Б.Л. Лазаревым, Н.К. Леонидовым, В.П. Лялюком, Н.Г. Маханьком, В.С. Новиковым, Ю.Н. Овчинниковым, С.К. Сибэгатуллиным, Е.Л. Сухановым, Н.П. Сысовым, А.К. Таракановым, В.П. Тарасовым, И.Г. Товаровским, Е.В. Тороповым, Ю.В. Федуловым, А.В. Ченцовым, В.С. Швыдким, К.А. Шумиловым и многими другими исследователями.

К настоящему времени достаточно отработаны информационные системы доменного процесса, но роль субъективного

фактора — опытного оператора-технолога в управлении доменной пещью является все еще преобладающей.

Несмотря на многовековую историю, процесс доменной плавки изучен еще не во всех деталях. Проблемой всех существующих математических моделей является недостаточно высокая точность значений входящих в них параметров. Это относится, в частности, к факторам, определяющим порозность столба шихты, поля скоростей движения твердых и жидких фаз, распределения газового потока, к параметрам скорости восстановления железорудных материалов и т. п. Процесс выплавки чугуна в доменной печи подвержен влиянию многих переменных контролируемых и неконтролируемых факторов, которые вызывают нарушения хода печи и ее теплового состояния и требуют высокой квалификации технологического персонала при управлении доменной плавкой [33, 55—59].

В истории науки и техники отечественные ученые-доменщики оказались пионерами в создании систем автоматического управления технологическими процессами. Еще до появления ЭВМ в 1939 г. проф. А.Н. Похвиснев предложил метод расчета «скоростного» теплового баланса для оперативного управления нагревом доменной печи. В середине 50-х, когда еще не производились серийно даже аналоговые машины, проф. В.А. Сорокин с помощью специально для этого изготовленной аналоговой машины предпринял попытку замкнутого управления процессом плавки на одной из доменных печей «Азовстали». С начала 60-х годов в СССР, а несколько позже — и во всем мире развернулся настоящий ажиотаж вокруг работ по автоматизации управления тепловым режимом доменной плавки. Этой проблемой занимались едва ли все исследовательские коллективы, связанные с черной металлургией. Но практические результаты даже в области автоматической стабилизации нагрева чугуна были весьма и весьма скромны. Главная причина была связана с исключительной сложностью доменного процесса и большим количеством неконтролируемых возмущений.

За прошедшие годы принципиальных изменений в области получения практических результатов не произошло. В настоящее время среди существующих на доменных печах мира интегрированных компьютерных систем контроля и управления лишь некоторые включают в свой состав модельные системы управления технологическим режимом доменной плавки. Очень редко эти сложные системы оперативного управления доменным процессом тиражируются, так как для эффективной их эксплуатации они должны быть адаптированы к условиям работы кон-

кретной печи. Все подобные модельные системы поддержки принятия решений системы в лучшем случае работают в режиме советчика оператора доменной печи.

С методической точки зрения обычно выделяют два основных подхода к математическому моделированию сложных систем, каковым является доменный процесс [8, 10, 11, 60—63].

*Первый из них, так называемый «метод черного ящика»*, реализуется, когда отказываются от попыток анализировать внутреннюю структуру системы, физику процесса. Сущность этого метода заключается в том, что вся область используемых значений входов и выходов объекта моделирования обследуется экспериментально и на основе данных эксперимента (характерных участков) устанавливаются математические соотношения между входами и выходами.

Метод «черного ящика» до недавнего времени был необычайно популярен. В качестве его главных достоинств выделяют простоту, разработанность и предопределенность применяемого математического аппарата. Недостатки этого подхода к моделированию очевидны. Он характеризуется недостаточной информативностью, ограниченностью результатов областью, подвергнутой экспериментальному обследованию. Полученные при этом математические уравнения будут справедливы для конкретных условий функционирования обследуемого объекта и их, как правило, нельзя переносить даже на однотипные объекты, работающие в иных условиях. Сказанное выше не означает, что метод «черного ящика» вообще бесполезен. Нет, речь идет о том, что каждый метод имеет свою наиболее подходящую область применения.

В зависимости от характера обрабатываемой информации модели этого подхода делятся на две группы.

К первой группе относятся модели, построенные на основе данных о нормальной эксплуатации доменной печи. Этот тип моделей дает хорошие результаты в тех случаях, когда они используются для определения статических и динамических характеристик доменной печи для конкретных условий работы. Как показывает практика, эти модели с определенной точностью (коэффициент корреляции 0,6—0,8) описывают взаимосвязи параметров [11, 37]. Следует, однако, отметить, что коэффициенты в полученных уравнениях обычно изменяются в весьма широких пределах (2—5 раз). Это связано как с различной статистической представительностью периода усреднения данных и подбором аргументов уравнения, так и с тем, что модели этого класса описывают поведение

конкретной доменной печи с присущими ей особенностями. Полученные при этом статические и динамические характеристики, установленные для некоторого периода работы печи, могут экстраполироваться на другие периоды лишь с привлечением дополнительной информации. Недостатком этих моделей является также и то, что они, удовлетворительно отражая технологические связи процесса, довольно поверхностно учитывают информационные взаимосвязи доменной печи как управляемой технологической системы, особенно специфику оперативного управления, действие возмущений и компенсирующих их воздействий.

Вторая группа моделей этого подхода характеризуется тем, что в основе лежат натурные данные о характерных периодах работы доменной печи при подаче на вход тестовых воздействий [37]. При этом возникает проблема выделения информативных участков натурных данных для описания сложных технологических систем. Например, установленная по экспериментальным данным в характерные периоды работы печи оценка влияния содержания железа в агломерате на удельный расход кокса учитывает изменение многих характеристик агломерата, сопровождающих изменение содержания железа, в том числе и восстановимости. Оценка, полученная в результате аналитического расчета и не учитывающая этот фактор, отличается в 1,5—2,0 раза.

Идеология такого подхода описания металлургических процессов, в том числе и доменного, успешно развивается в Сибирском государственном индустриальном университете [64, 65]. Необходимо отметить системный подход к разработке этих моделей. При таком подходе рассматриваются технологические и информационные взаимосвязи, позволяющие характеризовать доменную печь как управляемую систему, включающую в себя сложный технологический агрегат, различные механизмы и автоматические устройства, вычислительную технику и производственный персонал. Широкое использование методов математической статистики, предлагаемые эффективные способы и алгоритмы обработки технологической информации с использованием линеаризации являются основой направления по созданию многовариантных алгоритмов идентификации и адаптируемых моделей с переменной структурой, позволяющих повысить устойчивость модельной оценки. Однако полученные таким образом количественные зависимости между параметрами и показателями процесса справедливы только для доменных печей, на которых они были установлены. Это является характерной особенностью всех моде-

лей первого подхода, не позволяющей использовать их для разработки обобщенной методики анализа работы доменных печей.

В настоящее время модели доменного процесса этого класса приняты в качестве типовых для решения задач нормирования и оценки эффективности планируемых мероприятий доменного процесса. Так, широко используется метод пофакторного анализа работы доменных печей, представленный сводкой технологических факторов и величин их влияния на удельный расход кокса и производительность печи. Следует отметить, что метод пофакторного анализа чрезвычайно прост и многие годы использовался для решения задач нормирования и организации доменного производства в рамках предприятий или отрасли в целом. В этом случае изменения отчетных показателей обычно относительно невелики, тщательно выверены, а результаты расчетов анализируются и могут быть скорректированы специалистами в области доменной плавки. В то же время применение рассматриваемого метода для анализа работы отдельных печей в данной конкретной технологической ситуации выявило большие расхождения между фактическими и рассчитываемыми по корректировочным коэффициентам параметрами плавки.

*Вторым основным подходом к математическому моделированию металлургических процессов является аналитический подход, при котором модель строится исходя из внутренней структуры явлений, протекающих в системе. В этом случае входные и выходные параметры модели связываются друг с другом на основании универсальных законов сохранения и других фундаментальных физических и физико-химических закономерностей. Детальный обзор существующих математических методов описания доменного процесса, особенностей конструирования математических моделей и их применения выполнен в работах [11, 37].*

Зависимости, установленные в результате аналитического описания явлений доменной плавки, отражают общие закономерности процесса и, вследствие этого, обладают большими прогнозными возможностями. В зависимости от степени детализации явлений при аналитическом описании процесса различают балансовые и кинетические модели доменного процесса.

К первым математическим моделям доменного процесса этого класса можно отнести методы расчета расхода кокса по тепловому балансу. Эти методы положили начало простейшим балансовым моделям доменного процесса [58, 60, 66—74].



Проблема совместного решения системы материального и теплового балансов была полностью решена А.Н. Раммом [60].

Общий вид системы уравнений материально-теплового баланса [60] имеет следующий вид:

- по выходу чугуна:  $\Sigma(me_m) + se_s = 1$ ;
- по основности шлака:  $\Sigma(mRO_m) + sRO_s = 0$ ;
- по содержанию элементов в чугуне:  $\Sigma(mX_m) + sX_s = 0$ ;
- по содержанию оксидов в шлаке или относительной массе шлака:

$$\Sigma(mY_m) + Ye_s = 0;$$

- по тепловому балансу:  $\Sigma(mg_m) + sg_s = 0$ .

Здесь  $m$  и  $s$  — расходы компонентов шихты и углеводородной добавки соответственно, кг/т чугуна ( $\text{м}^3/\text{т}$ );

$e_m, RO_m, X_m, Y_m$  — соответственно выход чугуна из единицы компонента; избыток (+) или недостаток (–) оснований в материале при заданной основности шлака; избыток (+) или недостаток (–) оксида в материале при заданном его содержании в шлаке, кг/кг;

$g_m$  — тепловой эквивалент материала или затраты тепла на все превращения в печи, а для топлива — теплоотдача в печи, кДж/кг;

то же с индексом  $s$  для дутьевых добавок.

Развитие методов составления и использования тепловых балансов доменной плавки для анализа работы доменной печи и расчета показателей проектируемой плавки рассмотрено в работах [12, 68, 69, 72, 75—77].

Балансовые модели доменного процесса описывают закономерности тепло- и массообмена в самом общем виде. В основе их лежат материальные и тепловые балансы, устанавливающие взаимосвязи между режимными параметрами процесса, показателями работы печи и показателями ее теплового состояния. Низкая достоверность этой информации, связанная с несовершенством способов контроля доменного процесса, приводит к значительным погрешностям модельной оценки. Результативность анализа показателей доменной плавки в большей мере зависит от надежности исходных данных, на которые он опирается. Однако последние, как правило, отягощены погрешностями, величины которых неизвестны, что не только осложняет анализ, но иногда искажает его результаты.

Исследуя этот вопрос, А.Н. Рамм показал, что основные расчетные величины можно получить на основе балансовых уравнений —

углерода (С), азота (N), кислорода (O), попарных балансов (С, O), (С, N) и (O, N). При этом каждая пара балансов позволяет определить все расчетные величины, но погрешности определения этих величин при одних и тех же погрешностях исходных данных различны. Наиболее приемлемы расчеты на основе балансов (С, O) [60, 66].

А.Б. Шур [69], составив уравнение совместимости исходных данных, получил выражение для поправок, которые необходимо внести в эти данные, чтобы результаты расчета были непротиворечивы. Выбор корректируемых параметров не может быть формализован и является предметом специального анализа и проверки исходных данных.

В ходе анализа показателей доменной плавки И.Г. Товаровский показал [11, 37], что выявление невязок балансов железа, шлакообразующих и газифицированных элементов является важнейшим компонентом анализа.

Выполненный А.Н. Раммом [60] анализ влияния погрешностей отчетных данных на результаты расчета показал, что наибольшие погрешности связаны с неточным химическим анализом колошникового газа. Различия моделей доменного процесса и полученных с их помощью результатов определяются методами составления балансовых соотношений; подходами к определению величин, характеризующих использование восстановительного потенциала газового потока; структурами моделей и способами решения балансовых уравнений. В работе [37, табл. 5] приведены литературные данные о различных методах балансового расчета доменной плавки для оценки некоторых технологических мероприятий.

С помощью общего теплового баланса оценивают распределение тепла между различными его источниками и потребителями, оперируя начальным и конечным состоянием процесса. Это позволяет анализировать структуру использования тепла в доменной печи в целом. Однако общий тепловой баланс не позволяет оценивать влияние условий протекания процессов теплообмена в объеме печи, так как он рассчитывается по начальному и конечному состоянию системы, т. е. с учетом общего количества выделяющегося и потребляемого тепла. При этом не принимается во внимание, при каких температурах происходит передача тепла от газов к материалу. Поэтому даже при условии малой невязки составляющих общего теплового баланса нельзя ничего сказать о характере протекания процессов в диапазоне от начального состояния системы до конечного. Поскольку диапазон

температур материалов и газов в печи большой, а ценность высоко-низкотемпературного тепла с точки зрения потребности кокса различна, часто представляет интерес распределение тепла в отдельных зонах по высоте и определение лимитирующих (определяющих) зон.

В связи с этим возникла потребность в определении распределения тепла по высоте доменной печи, что можно осуществить с помощью составления и анализа зональных тепловых балансов [12, 77]. Для этой цели служит зональный тепловой баланс, составление которого требует знания характера распределения физико-химических и теплообменных процессов между различными температурными зонами печи. При удачном выборе температурных границ зон и перепадов температур с помощью метода зонального баланса удастся решать задачи, не поддающиеся решению на основе общего теплового баланса. Преимуществом включения зональных тепловых балансов в модели является возможность определения температуры колошникового газа расчетным путем, что обеспечивает большие прогнозные возможности этих моделей по сравнению с моделями, основанными на общем тепловом балансе доменной печи. Однако при этом приходится априорно задаваться степенью завершенности отдельных процессов в различных температурных интервалах. Другая трудность при составлении зональных балансов заключается в принятии определенного перепада температур между шихтовыми материалами и газом в этих зонах, особенно на их границах.

Таким образом, общим недостатком балансовых методов для оценки прогноза теплового состояния доменной печи является необходимость применения эмпирических соотношений, характеризующих эффективность использования тепловой и химической энергии газового потока, использовать для расчетов реальную (зашумленную) информацию о результатах работы печи.

Несколько позднее получил распространение математико-статистический метод определения расхода кокса, производительности печи и других показателей доменной плавки. Использование отдельных статистических зависимостей (например, степени прямого восстановления железа от расхода восстановителей, степени использования оксида углерода от расхода топлива и другие) в балансовых методах по расчету расхода кокса положило начало развитию балансово-статистических методов доменного процесса. К ним относятся методы А.Н. Рамма, А.В. Ченцова и др. [60, 66, 78].

Составление и решение системы дифференциальных уравнений, описывающих закономерности тепло- и массообмена с учетом кинетики протекающих в объеме печи химических реакций, лежит в основе кинетических моделей доменного процесса. Современные методы моделирования доменного процесса, положенные в основу этих моделей, сложились в результате развития теории теплообмена в слое с учетом изменения теплоемкостей потоков по высоте печи [79—82]. За последние годы они были дополнены и увязаны с закономерностями процессов массообмена, газо- и гидродинамики и технологическими особенностями доменной плавки [83—88].

Эти теоретические и экспериментальные работы по тепло- и массообмену в противотоке, механике движения материалов и газов в доменной печи, обобщенные в монографиях [79, 81, 82], позволили создать более сложные кинетические модели доменного процесса, развитию и применению которых способствовало использование компьютеров. В настоящее время разработано несколько десятков моделей доменного процесса, которые проанализированы в работах [11, 26, 37, 60, 76, 90—92].

Существенный вклад в исследование тепловых явлений доменного процесса внесены Уральской школой металлургов-теплотехников, основателем которой является проф., д-р техн. наук Б.И. Китаев [79, 80]. обстоятельный обзор математических моделей этого класса выполнен в работе [37], где отмечено, что в настоящее время даже при самом строгом теоретическом учете всех особенностей процесса невозможно избавиться от массы коэффициентов, определяемых опытным путем. Из-за вынужденных упрощений (ограничение количества рассматриваемых зон, описание отдельных участков доменной печи, рассмотрение только стационарного состояния) эти модели носят конкретный характер, определяемый поставленными задачами. Это объясняет появление в России и за рубежом целого ряда моделей доменного процесса самого различного назначения [8, 10, 11, 28, 37, 63, 75, 92—97, 145]. К числу наиболее полных моделей доменного процесса можно отнести кинетико-динамическую модель доменного процесса, разработанную в свое время во Всесоюзном институте металлургической теплотехники — ВНИИМТ [36, 98, 99, 110]. Как показывает практика, кинетические модели позволяют решать широкий круг практических задач: получать температурные и концентрационные поля доменной печи при плавке специальных чугунов, вдувании горячих восстановительных

газов; оценивать влияние на показатели работы печи таких параметров плавки, как восстановимость, степень металлизации железорудных материалов, реакционная способность кокса; определять общие закономерности динамических характеристик доменной печи по различным каналам.

В ряде случаев кинетические модели обогащаются моделями газодинамики, что расширяет область их применимости. Так, математическая модель доменного процесса, разрабатываемая в Институте металлургии УрО РАН, включает в себя следующие основные блоки [88, 92, 93, 100—105, 108]:

*Математическая модель газодинамики.* Практически реализована методика расчета газодинамической сетки и поля скоростей газа с использованием теории функций комплексного переменного при решении задачи о точечном источнике.

*Математическая модель теплообмена.* Получено аналитическое решение задачи о нагреве слоя при противоточном движении шихты и газа в случае произвольного изменения по высоте печи коэффициента теплоотдачи, теплоемкости потока газа и отношения теплоемкостей потоков шихты и газа с использованием поля скоростей газа.

*Математическая модель восстановления.* Выполнено численное решение системы дифференциальных уравнений массообмена и восстановления при введении в нее в явном виде модуля скорости газа, получаемого из математической модели газодинамики, а также с учетом зависимости суммарного коэффициента массообмена как от температуры, так и от степени восстановления.

Аналогичный подход используется и в модели Московского института стали и сплавов [94, 95, 106, 107].

В то же время существуют серьезные проблемы при создании и использовании кинетических моделей этого класса.

Прежде всего:

- из-за отсутствия достаточных данных для достоверного описания процессов, протекающих в нижней части доменной печи. Так, нет надежных данных о зависимости скоростей восстановления железа и кремния от температуры, состава шлака и кокса, о коэффициентах теплоотдачи между газом, коксом и жидкими продуктами плавки, не поддается полному математическому описанию время пребывания чугуна и вспенивающегося шлака между горизонтами перехода в жидкое состояние и уровнем фурм;
- из-за проблематичности учета влияния неравномерности распределения компонентов шихты и газа, фракционного

состава шихты на ход процессов теплопередачи, восстановления оксидов, газификации углерода и т. п.;

- из-за исключительной сложности решения системы нелинейных уравнений в частных производных при различных граничных и начальных условиях и др.;
- из-за вынужденных существенных упрощений, положенных в основу моделей этого класса. Необходимость предварительного определения кинетических характеристик железорудного сырья и соответствующей параметрической настройки модели для конкретных условий доменной плавки ограничивают их практическую применимость для решения задач текущего анализа, прогноза и управления ходом доменной плавки;
- из-за сложности описания движения шихтовых материалов в доменной печи.

Данные обстоятельства не позволяют устранить основное противоречие этого подхода, а именно: увеличение сложности модели, числа учитываемых факторов не приводит к повышению надежности результатов моделирования. В силу изложенного, можно согласиться с выводом И.Г. Товаровского, что «... для прогноза выходных параметров плавки на данном этапе развития целесообразно использовать относительно простые зависимости для тепломассообмена, газомеханики и других процессов, совмещенные с балансовыми уравнениями, результаты которых легко контролировать данными практики» [10]. В то же время, в условиях значительного расширения численного моделирования, возможностей компьютерной техники, внедрения современных измерительных систем и при условии дальнейшего исследования процессов можно надеяться в будущем на создание полных аналитических кинетико-математических моделей доменного процесса с большими возможностями прогнозного уровня.

Подчеркнем дополнительно, что одна из главных проблем математического моделирования доменного процесса связана с разрешением противоречий между сложностью моделируемого процесса и необходимостью решения технологических задач в одном темпе с процессом за заданный интервал времени с использованием реально имеющейся информации. Как показывает практика, используя полные модели доменного процесса, решить эту проблему не удастся. Определение конечных результатов доменной плавки с использованием прогнозных моделей этого класса дает не большую достоверность, чем некоторые ба-

лансовые модели. В то же время они не заменимы при анализе новых вариантов технологии доменной плавки, в частности при использовании новых видов железорудного сырья, определении оптимальных значений факторов при изменении конструктивных и режимных параметров работы печей.

Так Л. Богданди [109] в свое время классифицировал математические модели доменного процесса следующим образом: термодинамические, основанные на использовании I и II начал термодинамики, уточненные балансовые модели с коррекцией на кинетику процесса и математико-статистические модели. Отдавая предпочтение кинетическим моделям, Л. Богданди неоднократно отмечает малую практическую пригодность существующих моделей вследствие относительно грубого учета кинетики реакций и отсутствия многочисленных «кирпичиков», необходимых для составления полных моделей. Аналогичная классификация сделана в работе Б.А. Боковикова [110], в которой приведено математическое описание модели доменного процесса, разработанной ВНИИМ-Том. В работе И.Г. Товаровского и других отмечается, что решение общих задач оптимизации доменного процесса возможно только на основе использования кинетико-математической модели [11].

Однако в работе [111] справедливо отмечается, что неверно разрабатывать для каждого агрегата единственную математическую модель, учитывать и одновременно исследовать в ней весь сложный комплекс связей, реально существующих в данном агрегате. Такая постановка задачи была бы теоретически неверной, хотя бы из-за исключительной разноточности исходной информации.

Скептическое отношение к упрощенным моделям ряда исследователей, сложность и незавершенность кинетических моделей доменного процесса, по-видимому, являются основными причинами того, что методы оптимизации применительно к совершенствованию доменного производства используются недостаточно. В настоящее время, несмотря на многообразие математических моделей доменного процесса, большинство их является расчетными, т. е. позволяют исследовать методом перебора один или несколько заранее выбранных вариантов работы печи, но не позволяют аналитически рассчитать область оптимальных параметров доменного процесса. Выбор таких параметров зачастую производится на основании практических данных, интуитивных соображений и т. д.

Доменная плавка относится к числу непрерывных металлургических процессов, в основу которых положен принцип органи-

зованного противотока, что обуславливает высокую экономичность протекания тепловых и массообменных процессов. Так, тепловой коэффициент полезного действия доменной печи достигает 90—95 %, что значительно выше этого показателя на других металлургических печах [60, 78]. Но для этого необходимо организовать хороший контакт газов с шихтовыми материалами, т. е. необходимо обеспечить рациональное распределение газового потока, что является достаточно сложной задачей. В то же время доменное производство остается и самым энергоемким. На его долю приходится около 50 % топлива, используемого черной металлургией, а энергетические затраты на выплавку чугуна остаются еще высокими и превосходят теоретические значения [8—12, 55, 60, 76, 112, 113]. При этом основная доля энергетических затрат приходится на дорогостоящий и дефицитный кокс, на экономию которого и направлены основные мероприятия по совершенствованию технологии плавки. Сегодня уровень технологии доменной плавки в первую очередь определяется именно расходом кокса. Особенность доменного процесса заключается в том, что топливо в нем выполняет различные функции: как источник тепла; как химический реагент-восстановитель; кокс необходим и как механическая насадка в нижней части для фильтрации расплава. Эти разные, зачастую противоречивые, функции кокса приходится учитывать при управлении современной доменной плавкой.

Доменный процесс представляет собой сложную многофакторную систему, качество функционирования которой определяется как внешними условиями (составом шихты, параметрами дутья, конструктивными особенностями оборудования печи), так и технологическими аспектами доменной плавки (методами управления тепловым, шлаковым, газодинамическим режимами плавки), что требует комплексной оптимизации доменного процесса.

При разработке математической модели доменного процесса необходимо учитывать его специфику.

Доменный процесс относится к классу очень сложных динамических систем, распределенных в пространстве, характеризуется большим числом внешних и внутренних возмущений, которые носят стохастический характер.

Доменный процесс принадлежит к системам с распределенными параметрами. Математическое описание подобных объектов требует использования аппарата дифференциальных



уравнений в частных производных. При этом необходимо учитывать, что технологический процесс протекает во всем объеме печи, а управление им осуществляется изменением регулирующих воздействий на границах системы, поэтому математическое описание процесса должно быть представлено в виде краевой задачи, с заданием граничных условий. При постановке задач по управлению доменным процессом математическое описание его должно отражать поведение объекта во времени (динамику).

Доменный процесс представляет собой совокупность явлений газодинамики, движения шихты, теплообмена, восстановления, размягчения и других, которые могут рассматриваться как относительно независимые подсистемы, так как характеризуют различные стороны доменного процесса и описываются различными уравнениями. Однако все эти подсистемы тесно связаны между собой и оказывают друг на друга взаимное влияние.

Полное математическое описание доменного процесса должно включать в себя следующие подсистемы:

- загрузка шихтовых материалов на колошнике печи;
- фурменный очаг;
- движение шихты, газа и расплава;
- восстановление и теплообмен;
- зона первичного шлакообразования и размягчения железорудной части шихты (зона вязкопластического состояния материалов).

Анализ процессов, протекающих в объеме доменной печи, свидетельствует о значительном многообразии сложных, не полностью изученных явлений. Поэтому комплексное и полное их моделирование на фундаментальном уровне и сегодня не представляется возможным.

Глубина и полнота математического описания отдельных подсистем различна. Наименее разработаны модели движения сыпучих материалов в печи, процессов в зоне вязкопластического состояния материалов, большие успехи достигнуты в области математического моделирования процессов теплообмена, восстановления.

Так, первая модель процессов в зоне плавления была создана еще в 1970 г. японскими исследователями. Геометрические размеры зоны вязко-пластических состояний, зависящие от температур размягчения и плавления железорудных материалов, распределения температур по сечению и высоте печи,

определяя устойчивость газораспределения и газодинамику, лимитируют интенсивность плавки и тем самым определяют предельные показатели производительности. Математическое моделирование этих явлений представляет значительный интерес для решения практических задач распределения материалов по сечению печи, регулирования основности, рудной нагрузки в локальных областях по радиусу печи. В то же время в силу недостаточной изученности и исключительной сложности процессов в этой зоне, несмотря на усилия многих исследователей, и сегодня полные математические модели процессов зоны размягчения далеки от совершенства. Они скорее находятся на стадии методических разработок, чем получения надежных результатов для данных конкретных условий работы доменной печи, поэтому практически не используются для текущего контроля и оперативного управления процессом.

Следует отметить, что сложность доменного процесса, необходимость определения оптимальных параметров доменной плавки при изменении условий ее ведения, возрастающая цена ошибок управления при управлении тепловым и газодинамическим режимами — эти и другие факторы определяют потребность в разработке новых информационных систем. Анализ современного уровня знаний основных закономерностей доменного процесса, имеющихся технических средств контроля, существенное расширение возможностей вычислительной техники и области применения методов математического моделирования показывают, что наиболее перспективными методами для диагностики состояния доменной печи являются, наряду с инструментальными, расчетно-инструментальные и компьютерные [17, 50, 51, 61, 114, 146, 147]. Примерами достижений в этой области являются автоматическая зондовая сканирующая компьютерная система DDS-МИСиС, позволяющая контролировать распределение кокса и железорудных материалов непосредственно в доменной печи [114], система контроля теплового состояния и остаточной толщины футеровки металлоприемника [50, 147].

Однако до настоящего времени остаются нерешенными наиболее сложные задачи контроля и управления тепловым, газодинамическим и шлаковым режимами доменной печи. Решение этих задач возможно только с применением методов математического моделирования [26, 32, 63, 115—122].

## 1.4. Современные принципы построения модельных систем поддержки принятия решений и пакетов прикладных программ для управления технологией доменной плавки

Модельные системы поддержки принятия решений и соответствующие им информационные технологии появились в основном в 80-е годы, чему способствовали развитие теории моделирования, математики, в особенности численных методов решения, широкое распространение персональных компьютеров, пакетов прикладных программ. Эти системы нашли применение при поиске путей компенсации возмущений, влияющих на развитие основных процессов доменной плавки, и при решении задач минимизации затрат материальных и энергетических ресурсов на выплавку чугуна.

Модельные системы поддержки принятия решений представляют собой вид компьютерных информационных систем, помогающих лицу, принимающему решение (ЛПР), в принятии решений при наличии плохо структурированных задач посредством прямого диалога с компьютером с использованием данных и математических моделей.

Главной особенностью модельных систем поддержки принятия решений является качественно новый метод организации взаимодействия человека и компьютера. Выработка решения, что является основной целью этой технологии, происходит в результате итерационного процесса (рис. 1.8), в котором участвуют:

- система поддержки принятия решений в роли вычислительного звена и объекта;
- человек как управляющее звено, задающее входные данные и оценивающее полученный результат вычислений на компьютере.



Рис. 1.8. Технология модельной системы поддержки принятия решений как итерационный процесс

Окончание итерационного процесса происходит по воле человека (оператора, технолога, лица, принимающего решение).

Рассмотрим в самом общем виде структуру модельной системы поддержки принятия решений.

В состав модельной системы поддержки принятия решений входят три главных компонента (рис. 1.9):

- 1) база данных;
- 2) база моделей;
- 3) система управления интерфейсом между пользователем и компьютером.

База данных в модельной системе поддержки принятия решений играет важную роль, поскольку данные могут использоваться непосредственно пользователем для расчетов при помощи математических моделей.

База моделей (комплекс различных моделей) используется для описания и оптимизации процесса. Без моделей осуществлять процессы в информационных системах можно только методом проб и ошибок («дерганья» металлургических систем), что, конечно же, неприемлемо в современной металлургии. Заметим, что комплекс математических моделей является основой модельной системы поддержки принятия решения. Пользователь имеет возможность получить недостающую ему информацию для принятия решения путем установления диалога с моделью, что облегчает выработку и оценку альтернатив решения.

Система управления базой моделей (СУБМ) должна обладать следующими возможностями: создавать новые модели или изменять существующие, поддерживать и обновлять параметры

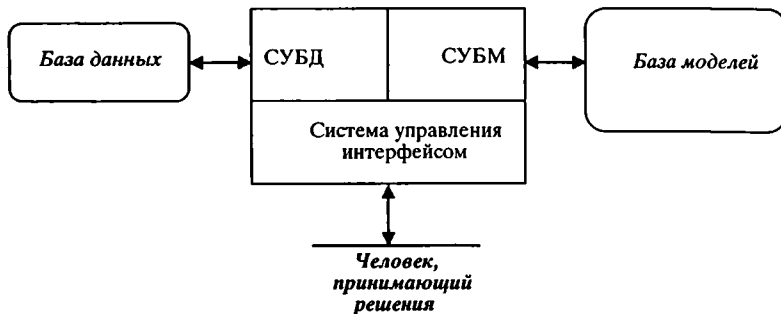


Рис. 1.9. Основные компоненты модельной системы поддержки принятия решений

моделей (осуществлять идентификацию параметров), манипулировать моделями.

Система управления интерфейсом определяет язык пользователя, язык сообщений компьютера, организующий диалог на экране дисплея. Язык пользователя — это те действия, которые пользователь производит в отношении системы путем использования возможностей клавиатуры, мыши и т. п. Язык сообщений — это то, что пользователь видит на экране дисплея, данные, полученные на принтере, звук и т. п. В процессе диалога пользователь должен реализовать свои знания. Сюда относится не только план действий, находящийся в голове у пользователя, но и инструкции, справочные данные, выдаваемые компьютером по команде о помощи. Инструкции и справочные данные, выдаваемые системой по просьбе пользователя, обычно не стандартны, а специализированы с точки зрения сложившейся ситуации.

Анализ особенностей построения математических моделей показал, что их адекватность реальным процессам зависит от степени изученности процессов. Поскольку параметрическая идентификация в реальных условиях по параметрам внутреннего состояния возможна лишь очень приближенно (скорее качественно), ее производят по выходным параметрам (расход кокса, производительность, параметры чугуна и шлака и колошникового газа), что не позволяет дать однозначную оценку адекватности модели реальным процессам. На данной стадии разработки требуемая степень адекватности модели определяется целью функционирования и характером решаемой задачи, а достигнутая степень адекватности — возможностями изучения процессов плавки. Одна и та же модель может быть адекватна процессу плавки при одном способе функционирования и не адекватна при другом. В силу этого при моделировании доменного процесса всегда требуется четкая постановка функциональной задачи модели. В зависимости от этой постановки одни явления описывают более детально, другие — упрощают, третьими — пренебрегают. В некоторых случаях важна не столько детальность описания отдельных явлений, сколько полнота учета всех наиболее существенных факторов.

В силу изложенного для прогноза выходных характеристик плавки на данном этапе развития целесообразно использовать относительно простые зависимости для тепломассобмена, газодинамики и других процессов, совмещенные с балансовыми уравнениями, результаты которых легко контролировать по фактическим (натурным) данным.

Опыт математического моделирования в различных областях показал, что полезно начинать с простых расчетных моделей. В дальнейшем на их основе можно будет создать достаточно сложную оптимизационную модель, но даже при наличии достоверной информации в практическом использовании математических моделей, формировании вариантов решения и принятии окончательных решений активная и решающая роль все же принадлежит человеку.

К настоящему времени вопросы математического моделирования и информационного обеспечения доменных процессов в значительной мере разработаны. Однако вопрос об автоматизированном управлении доменной печью остается открытым. Верхний уровень управления АСУ ТП практически не реализован на доменных печах.

Это объясняется многими причинами, в том числе тем, что не отработаны модели, которые могут работать в режиме on line, оценивать достоверность собираемой информации и решать задачи интеллектуального уровня с использованием человеко-машинных интерфейсов. Тем не менее усилия по решению этой проблемы продолжают наращиваться, но при этом весьма важно определиться с ролью, которую математические модели разного уровня могут играть при решении задач управления.

Требования к составу верхнего уровня АСУ ТП исходят из необходимости его насыщения технологическими задачами. Сегодня руководству доменного цеха стала очевидной роль систем верхнего АСУ ТП в том, что экономическая отдача от модернизации автоматизации, а также устойчивое безаварийное состояние и надежная работа агрегатов определяются во многом использованием эффективных систем диагностики, предупреждения, прогноза и оптимизации, которые основаны на моделировании технологических процессов.

Практика эксплуатации систем верхнего уровня АСУ ТП, использующих моделирование, показала нецелесообразность внедрения математических моделей, в которых нет ориентации на надежные технические средства измерения и контроля, существующие на доменных печах, а также отсутствует возможность проверки результатов расчетов и теоретических предположений.

Основные принципы построения программного обеспечения сводятся к следующему [17, 19, 123, 124, 130]:

*Функциональность*, которая обеспечивается благодаря использованию эффективных математических моделей. В основу программного обеспечения положены современные достижения в областях теории и технологии современной доменной плавки, математического моделирования и оптимального управления техническими системами.

*Интуитивно понятный интерфейс*. Он обеспечивает легкое и быстрое восприятие информации человеком, за которым остается «последнее слово» в принятии решения, а также быстрый и безошибочный ввод информации. АРМ технологического персонала работает под управлением ОС Windows, поэтому в основу пользовательского интерфейса положены стандартные диалоговые элементы: окна, строковые опускающиеся меню, панели инструментов; используются элементы визуализации и структурирования обработанных данных — графики, диаграммы, таблицы и т. п.

*Расширяемость и открытость систем*, которая достигается за счет модульной структуры и использования стандартных интерфейсов. Каждый из модулей имеет четко очерченный круг функций, минимально взаимодействует с другими модулями и имеет возможность расширения независимо от других модулей. Для организации взаимодействия между приложениями используются технологии DDE, OLE, COM, DCOM и другие. Для построения модульной структуры используется принцип декомпозиции задач и моделей. Для реализации этого принципа используются средства автоматизированного проектирования информационных систем — CASE-средства. Для функционального моделирования технологических процессов в этих системах используются методики проектирования IDEF0 и IDEF1X.

*Интеграция с базами данных*. Одной из характерных особенностей разрабатываемого в настоящее время программного обеспечения для управления сложными металлургическими процессами является использование больших массивов данных для получения и представления новой информации о ходе технологического процесса в реальном времени. Для решения этих задач используются распределенные трехуровневые приложения баз данных Windows DNA, в которых, в отличие от клиент/серверных приложений, клиенты не имеют непосредственного доступа к критическим ресурсам, таким как соединения с базой данных. Поэтому такие ресурсы полностью защищены от непредсказуемых действий пользователя.

*Оценивание информации.* Для металлургического производства характерной особенностью использования в приложениях информации из распределенных баз данных является тот факт, что эта информация не является полной. Причиной этому служит зашумленность информации, ее запаздывание, а также отсутствие технических средств контроля информации. Поэтому в разработанных программных продуктах предусмотрена подсистема оценивания информации и соответствующее программное обеспечение.

*Безопасность.* Защита от несанкционированного доступа осуществляется путем использования подсистемы распределения прав доступа, а защита от непреднамеренного неверного ввода информации обеспечивается функционированием специально разработанной модели, которая оценивает введенную информацию по интегральным показателям.



## Глава 2

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА

## 2.1. Построение концептуальной модели

При решении технологических задач используется натурно-модельный подход к расчету состояния доменной плавки, заключающийся в использовании для настройки параметров модели практических данных о работе доменной печи. Этот подход предполагает оценку достоверности используемой информации и в соответствии с этим настройку структуры модели [25, 34, 35, 79, 123, 130].

Разработанная в УГТУ—УПИ в рамках натурно-модельного подхода балансовая модель доменного процесса в общем виде представляет собой систему детерминированных зависимостей, характеризующих тепловой, восстановительный, дутьевой, газодинамический и шлаковый режимы доменной плавки. Принятая при описании концепция опорно-возмущенного движения позволяет решать задачи с применением относительно простого математического аппарата, но с использованием физической сущности процессов, протекающих в доменной печи.

Условно модель можно разделить на две части — модель базового состояния и прогнозирующую модель. Модель базового (эталонного) состояния позволяет ретроспективно оценивать состояние процесса по усредненным показателям за базовый (эталонный) период работы печи. При этом используется вся фактически доступная информация о параметрах шихты, комбинированного дутья, колошникового газа и продуктов плавки. Прогнозирующая же модель на основании результатов, полученных с помощью модели базового (эталонного) состояния, позволяет оценить показатели доменного процесса в случае изменения условий плавки.

Современный доменный процесс относится к классу нелинейных, очень сложных систем, распределенных как в пространстве, так и во времени, и характеризуется при этом наличием большого числа внешних и внутренних возмущений, которые носят стохастический характер, а также сложностью взаимосвязи отдельных процессов. При разработке математических моделей доменного процесса необходимо использовать методологию системных исследований.

В соответствии с этой методологией математическая модель системы представляется как многоуровневая конструкция, состоящая из взаимодействующих элементов, объединенных в подсистемы различных уровней. Для каждой выделенной подсистемы (элемента) характерно взаимодействие с другими подсистемами (элементами) и с внешней средой. Каждый элемент математической модели обычно может иметь различную степень детализации математического описания. Важно лишь, чтобы входные и выходные параметры всех элементов модели находились во взаимном соответствии, что обеспечивает получение замкнутой системы уравнений математической модели процесса в целом [61, 126—129].

Анализ доменного процесса как объекта моделирования показывает, что при решении задач анализа и прогноза показателей доменной плавки с использованием реально доступной информации о работе печи требуется декомпозиция исходной системы ( $S_0$ ) на три основные подсистемы:

- теплового состояния доменной печи ( $S_1$ );
- дутьевого и газодинамического режимов доменной плавки ( $S_2$ );
- шлакового режима ( $S_3$ ).

Указанные подсистемы на самом укрупненном уровне охватывают основные явления, свойственные доменному процессу. Их выделение из общей системы (декомпозиция) обусловлено тем обстоятельством, что закономерности функционирования каждой подсистемы описываются вполне определенным законом сохранения либо их функционирование является относительно самостоятельным. Все эти подсистемы в принципе можно описать аналитически. Однако полнота описания подсистем различна. Наибольшие достижения при этом достигнуты в области разработки теплотехнической информационно-моделирующей подсистемы доменного процесса, в основу которой положен принцип натурно-математического моделирования. Наибольшие сложности вызывает математическое описание дутьевого, газодинамического и шлакового режимов, полное аналитическое описание которых невозможно, поэтому целесообразно использовать справочные (априорные) данные и эмпирические соотношения.

Анализ функциональных связей подсистем показывает, что все эти подсистемы взаимосвязаны и через общие параметры определяют работу друг друга. С учетом изложенного обобщенная модель доменного процесса может быть представлена в виде ори-

ентированного графа (рис. 2.1), в вершинах которого расположены подсистемы  $S_i$ , а взаимодействие этих подсистем осуществляется посредством связей, характеризуемых вектором  $A_{ij}^0$ . Вектор взаимодействия подсистем  $A_{ij}^0$  определяет совокупность явлений при взаимодействии  $i$ -й и  $j$ -й подсистем. Заметим, что внешняя среда системы представлена на рис. 2.1 в виде фиктивной системы  $S_f$ , которая оказывает влияние на систему  $S_0$  (подсистемы  $S_i$ ) посредством векторов  $A_{if}^{(k)}$ , где  $i$  — индекс номера внутренней модели подсистемы,  $k$  — индекс номера внешнего входного блока.

Это обусловлено тем, что ход тепломассообменных, газодинамических процессов и процессов шлакообразования в значительной степени зависит от внешних условий: режимных и конструктивных параметров работы доменной печи (расхода, состава, температуры дутья и инжектируемого топлива, подаваемых в печь, расхода, физико-химических свойств загружаемого железорудного сырья и кокса, конструктивных размеров печи и т. п.).

Влияние модели  $S_0$  (подсистемы  $S_i$ ) на внешнюю среду  $S_f$  отражено на рис. 2.1 вектором  $A_{if}^{(l)}$ , где  $i$  — индекс номера внутренней модели подсистемы;  $(l)$  — индекс номера внешнего выходного блока. В результате моделирования системы определяются численные значения компонентов вектора  $A_{if}^{(l)}$ , т. е. прогнозируются состав чугуна, свойства шлака, расход кокса, производительность печи, дутьевые параметры, параметры комбинированного дутья и т. д.

Таким образом, параметрами модели являются:

- входные  $X_{от}$  — конструктивные и режимные параметры работы печи, физические свойства и химический состав загружаемых шихтовых материалов, дутьевые параметры, параметры комбинированного дутья, химический состав и физические свойства выплавляемого чугуна и т. д. на заданном интервале времени  $[0; \tau]$ ;
- выходные  $Y(\tau)$  — прогнозные параметры работы печи (состав получаемого чугуна, производительность, расход кокса и т. п.) в данный момент времени;
- состояния системы  $P(\tau)$  — параметры, характеризующие развитие тепломассообменных, газодинамических процессов, процессов шлакообразования (например, степень прямого восстановления, параметры фурменного очага, критерий газодинамической устойчивости слоя, коэффициент распределения серы, вязкость шлака и т. п.) в данный момент времени  $\tau$ ;

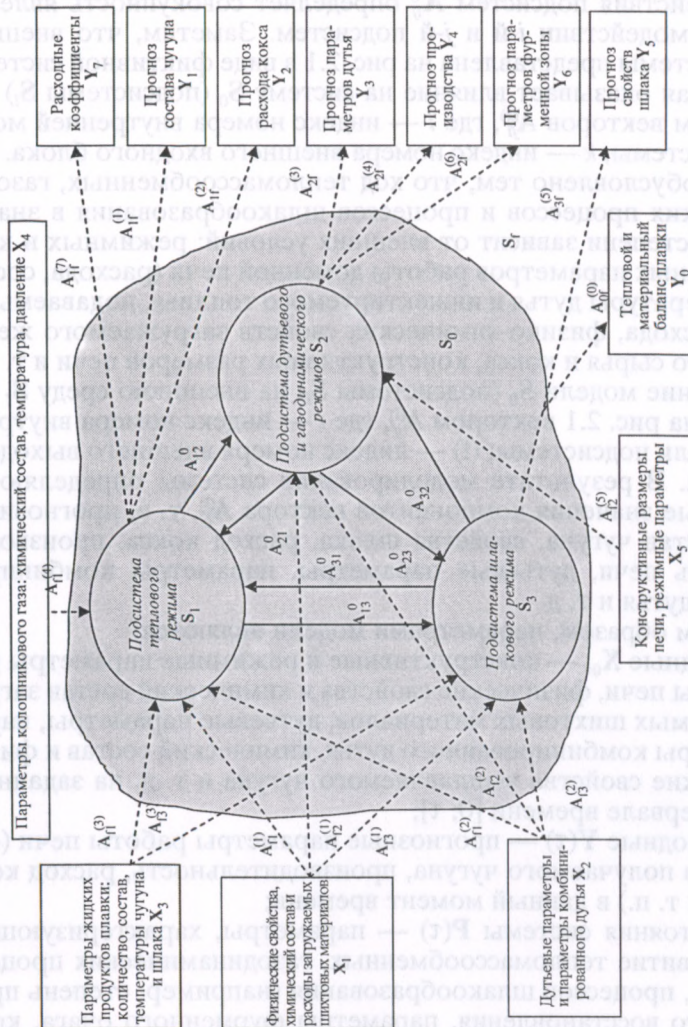


Рис. 2.1. Структура модели доменного процесса

- оператор перехода  $\mathbf{Sp}$  — уравнения (операторы), описывающие зависимость параметров состояния системы  $P(\tau)$  от входных параметров  $X_{0\tau}$  и начального состояния системы  $P(0)$ :

$$P(\tau) = \mathbf{Sp}\{X_{0\tau}, P(0), [0; \tau]\}; \quad (2.1)$$

- оператор выхода  $\mathbf{F}$  — уравнения (операторы), описывающие зависимость выходных параметров системы  $Y(\tau)$  в данный момент времени  $\tau$  от параметров состояния системы  $P(\tau)$  и интервала времени  $[0; \tau]$ :

$$Y(\tau) = \mathbf{F}\{P(\tau), [0; \tau]\}. \quad (2.2)$$

Перейдем к рассмотрению структуры отдельных подсистем  $S_0 = \{S_1, S_2, S_3\}$  и конкретизируем структуру параметров  $X, Y, P$  операторов  $\mathbf{Sp}$  и  $\mathbf{F}$  для этих подсистем.

## 2.2. Подсистема теплового состояния доменной печи ( $S_1$ )

Основными задачами моделирования теплового состояния доменной печи являются:

- оценка влияния топливно-сырьевых условий и параметров комбинированного дутья на производительность печи и удельный расход кокса;
- прогноз изменения химического состава продуктов плавки при изменении параметров загружаемой шихты и комбинированного дутья.

В основу натурно-модельного подхода для решения задач текущего анализа, прогноза и управления тепловым состоянием доменной печи положена концепция двухступенчатого развития процессов теплообмена в доменной печи, предложенная проф. Б.И. Китаевым и развитая его учениками [21—25, 79—82].

В соответствии с этой концепцией теплообмен между потоками шихтовых материалов и газов в доменной печи осуществляется последовательно в двух зонах (верхней и нижней), разделенных зоной замедленного теплообмена (рис. 2.2).

При этом считается, что верхняя тепловая зона определяет интенсивность развития процессов косвенного восстановления, а нижняя определяет затраты тепла на прямое восстановление, физический и химический нагрев продуктов плав-

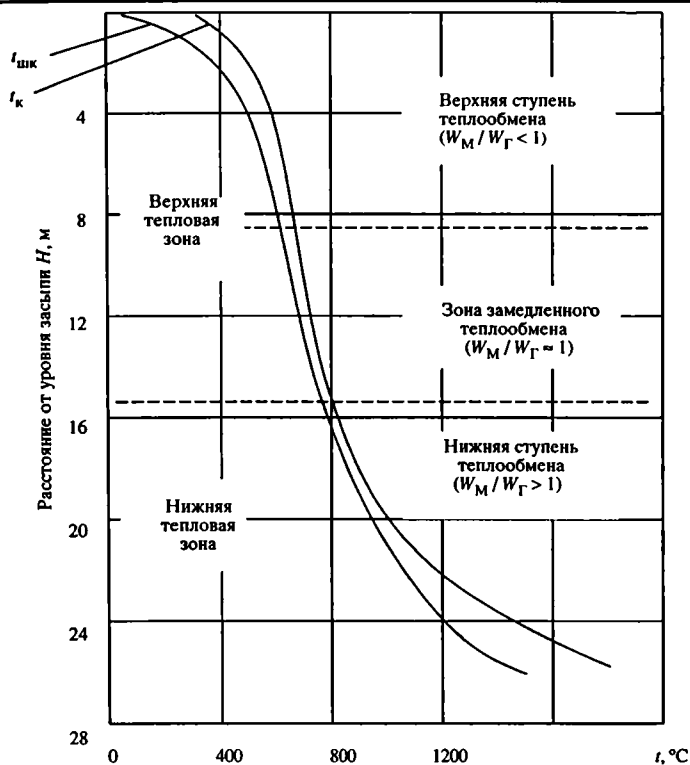


Рис. 2.2. Схема температурного поля доменной печи

ки. Граница раздела зон теплообмена проходит по изотермической поверхности, температура которой соответствует температуре развития реакции газификации углерода кокса диоксидом углерода (конкретной для каждой технологии), которая составляет 800—900 °C. Теплообмен в отдельных зонах характеризуется завершенностью, а тепловая работа зон — автономностью. При этом разность температур материалов и газов на границе зон составляет 20—50 °C. Зона замедленного теплообмена, разделяющая зоны активного теплообмена, характеризуется отношением теплоемкостей потоков шихты и газа  $W_M / W_\Gamma \approx 1$ . Верхняя ступень теплообмена имеет  $W_M / W_\Gamma < 1$ , а нижняя  $W_M / W_\Gamma > 1$ . Напомним, что под теплоемкостью потока  $W$  понимается произведение расхода потока

(шихты  $G_m$ , газа  $G_r$ ) на удельную теплоемкость вещества потока, Вт/°C:

$$W_m = G_m c_m, W_r = G_r c_r. \quad (2.3)$$

Физически теплоемкость потока  $W$  показывает, какое количество тепла следует подвести (отвести) к потоку, чтобы данный поток нагреть (охладить) на 1 градус.

Изменение теплоемкости потока шихты по высоте печи происходит за счет развития физико-химических процессов, связанных со значительным поглощением тепла.

Установившееся в результате теплообмена температурное поле доменной печи определяет развитие основных процессов доменной плавки: восстановление железа и других элементов, формирование состава продуктов плавки, явления в зоне вязкопластического состояния. В этом случае условия, при которых протекают процессы тепло- и массообмена в объеме печи, принято обозначать термином «тепловое состояние доменной печи».

Рассматривая характер теплообменных процессов по мере совершенствования доменной плавки и развитие самой теории теплообмена в доменной печи, следует отметить существенные изменения как в ходе процессов, так и в углублении их познания. Однако при этом главным и неизменным положением теории остается двухступенчатая схема теплообмена по высоте столба материалов, которая хотя и может существенно отличаться для отдельных вертикальных элементов печи и разных режимов плавки, но подчиняется одним и тем же закономерностям [75, 85—87].

Математическим моделированием и экспериментальными исследованиями доказано влияние температурного поля верха доменной печи на показатели доменной плавки. Детальный анализ взаимного влияния температурного поля и восстановительных процессов в области шахты доменной печи показал, что влияние температурного поля верхней зоны на тепловое состояние низа печи может быть с достаточной для практического применения точностью оценено через степень прямого восстановления оксидов железа. Тем самым результаты доменной плавки увязываются с режимными параметрами и закономерностями тепло- и массообмена в шахте печи.

В качестве количественного показателя теплового состояния верхней зоны теплообмена (шахты) доменной печи используется расчетная величина — индекс температурного поля верха

ней зоны печи  $i_b$ , определяемый как отношение средней по массе температуры шихтовых материалов в этой зоне  $t_{ш}$  к температуре на границе раздела верхней и нижней зон  $t_{ш0}$ .

$$i_b = \frac{\overline{t_{ш}}}{t_{ш0}} = \frac{1}{t_{ш0} H_0} \int_0^{H_0} t_{ш}(h) dh. \quad (2.4)$$

Используя закономерности противоточного теплообмена в плотном слое, можно вывести конечное выражение  $i_b$  через параметры текущего контроля хода доменного процесса:

$$i_b = \frac{t_k - m t_{шк} - \frac{1}{B} (t_k - t_{шк}) (1 - \exp(-B))}{t_k - m t_{шк} - (t_k - t_{шк}) \exp(-B)}, \quad (2.4a)$$

где  $t_k$  — средняя температура колошниковога газа в общем газотоводе, °C;

$t_{шк}$  — средняя температура загружаемых в печь шихтовых материалов, °C;

$m$  — среднее для верхней зоны печи отношение теплоемкостей потоков шихты и газа  $m = 0,5(1 + W_m/W_r)$ , доли ед.;

$W_r$  — теплоемкость потока газа на колошнике доменной печи, Вт/град;

$W_m$  — теплоемкость потока шихты на колошнике доменной печи, Вт/град;

$B$  — показатель интенсивности теплообмена в верхней части печи, доли ед., определяемый по выражению

$$B = \frac{\alpha_v S}{W_{ш}} (1 - m) H_0;$$

$\alpha_v$  — средний для верхней зоны печи объемный коэффициент теплообмена между потоками шихты и газа, Вт/(м³ град);

$S$  — средняя площадь сечения шахты, м²;

$H_0$  — средняя высота верхней тепловой зоны, м.

Индекс верха  $i_b$  характеризует развитие процессов косвенного восстановления оксидов железа и отражает комплекс условий, от которых зависят основные показатели доменного процесса — производительность и удельный расход кокса.

На рис. 2.3, а представлены температурные поля шихтовых материалов, возможные в верхней тепловой зоне доменной пе-



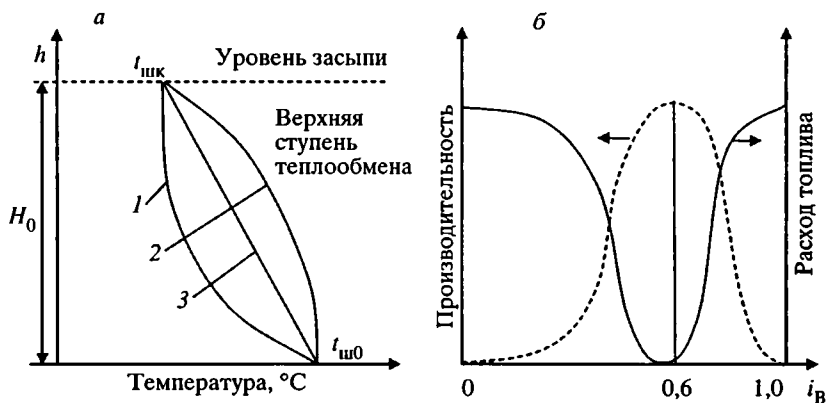


Рис. 2.3. Температурные поля шихтовых материалов в верхней части доменной печи

чи. Каждому из этих температурных полей соответствует определенный ход восстановительных процессов, расход топлива и производительность. Линия 1 характеризует работу доменной печи, когда  $i_b = 0,5$ . Этот случай с технологической точки зрения не пригоден, так как не обеспечивает температурные условия для развития восстановительных процессов. При  $i_b = 0,5$  поле 3 практически нежелательно, так как под действием неконтролируемых возмущений оно может перейти в область аварийной работы, т. е.  $i_b < 0,5$ . В противоположность этому линия 2 ( $0,8 < i_b < 1,0$ ) иллюстрирует температурное поле при повышенном расходе топлива. Хотя восстановительные процессы в шахте и начинаются значительно раньше, это температурное поле считается неприемлемым, так как требует избыточного расхода топлива. Таким образом, оптимальное значение  $i_b$  может изменяться, как показывает опыт работы доменных печей по современной технологии, в относительно узких пределах (0,55—0,80) в зависимости от значений конструктивных и режимных параметров работы конкретных доменных печей: неравномерности распределения материалов, характеристик проплавления сырья и т. п.

Следовательно, для определения оптимального теплового режима шахты доменной печи необходимо использовать зависимость расхода топлива (кокса) и производительности печи от  $i_b$ . Существование экстремальной зависимости  $i_b$  от производи-

ности и расхода топлива, представленной на рис. 2.3, б, позволяет определять оптимальное значение  $i_v$ , соответствующее такому распределению температур в шахте, при котором достигается работа доменной печи с минимальным расходом кокса и максимальной производительностью. Оптимальное температурное поле материалов в шахте зависит, в частности, от восстановимости железорудной части шихты и ее механической прочности. Чем выше при прочих равных условиях восстановимость железорудной части шихты и ее механическая прочность, тем ниже оптимальное значение  $i_v$ .

Химический состав чугуна определяется тепловым состоянием нижней зоны доменной печи и химическим составом загружаемой шихты. Для количественной оценки теплового состояния низа доменной печи принята величина, характеризующая удельные затраты тепла в области высоких температур на образование и нагрев жидких продуктов плавки. При этом расчет обобщенных параметров, характеризующих тепловое состояние нижней части доменной печи, построен на анализе теплового баланса этой зоны, который можно записать в следующем виде:

$$Q_{\text{пп}} = Q_{\Sigma} + Q_{\text{ш}} - Q_d - Q_{\text{ф}} - Q_{\text{п}}, \quad (2.5)$$

где  $Q_{\text{пп}}$  — удельная энтальпия продуктов плавки, включая теплоту плавления чугуна, за вычетом теплоты образования шлака (затраты тепла на физический нагрев продуктов плавки и восстановление в чугун оксидов трудновосстановимых элементов по реакциям прямого восстановления), кДж/т чугуна;

$Q_{\Sigma}$  — суммарный (полезный) приход тепла в нижнюю зону печи от сжигания кокса, инжектируемого топлива, рассчитанный с учетом влажности дутья, изменения теплосодержания газозоодушного потока, а также затрат тепла на разложение углеводородов и тепла, уносимого газом, покидающим нижнюю зону при температуре газа в зоне замедленного теплообмена ( $t_{\text{го}}$ ), кДж/т чугуна;

$Q_{\text{ш}}$  — количество тепла, поступающего в нижнюю зону печи с шихтой при температуре  $t_{\text{ш0}}$ , кДж/т чугуна;

$Q_d$  — затраты тепла на прямое восстановление железа, кДж/т чугуна;

$Q_{\text{ф}}$  — затраты тепла на разложение и восстановление флюсов, кДж/т чугуна;

$Q_{\text{п}}$  — тепловые потери в окружающую среду через фурменный пояс, распар и заплечики, кДж/т чугуна.

Используя известные соотношения для расчета статей теплового баланса нижней зоны доменной печи, уравнение теплового баланса нижней зоны доменной печи (2.5) можно записать в следующей форме [17, 25, 79, 80]:

$$q_r / P + Q_{\text{ш}} - 31750 [\text{Fe}]r_d - Q_{\text{ф}} - Q_{\text{п}} = Q_{\text{пп}}, \quad (2.6)$$

где  $q_r$  — полезная тепловая мощность газового потока, учитывающая: физическое тепло дутья, тепло горения углерода до CO, тепло, затраченное на конверсию природного газа и диссоциацию водяных паров, потери тепла с газовым потоком, покидающим нижнюю зону печи, кДж/мин;

$P$  — производительность печи (интенсивность плавки), т/мин;

$r_d$  — степень прямого восстановления железа, доли ед.;

31750 — тепловой эффект реакции прямого восстановления железа, кДж/т чугуна;

$[\text{Fe}]$  — содержание железа в чугуне, %.

Правая часть уравнения (2.6) определяет оптимальные затраты тепла на выплавку 1 тонны чугуна данного состава при существующих конкретных условиях работы печи. Так как при расчете величины  $Q_{\text{пп}}$  учесть все действующие факторы трудно, значение правой части уравнения является параметром настройки модели, которое может быть ориентировочно оценено с использованием информации о показателях процесса по уравнению

$$Q_{\text{пп}} = 226500[\text{Si}] + 52250[\text{Mn}] + 265000 [\text{P}] + 145000 [\text{Ti}] + \\ + 70800[\text{Cr}] + 59400U(\text{S}) + 1000(c_{\text{ч}}t_{\text{ч}} + c_{\text{ш}}t_{\text{ш}}U), \quad (2.7)$$

где  $[\text{Si}]$ ,  $[\text{Mn}]$ ,  $[\text{P}]$ ,  $[\text{Ti}]$ ,  $[\text{Cr}]$  — содержание кремния, марганца, фосфора, титана и хрома в чугуне, %;

(S) — содержание серы в шлаке, %;

$c_{\text{ч}}$ ,  $c_{\text{ш}}$  — теплоемкость чугуна и шлака соответственно, кДж/(кг °C);

$t_{\text{ч}}$ ,  $t_{\text{ш}}$  — температура чугуна и шлака соответственно, °C;

$U$  — выход шлака, т/т чугуна.

Левая часть уравнения (2.6) представляет собой сумму основных статей теплового баланса доменной печи, отражает влияние всех контролируемых технологических факторов на ход плавки и может быть рассчитана с привлечением технологической ин-

формации о процессе. Значение левой части уравнения теплового баланса нижней зоны доменной печи принято считать обобщенным показателем теплового состояния низа доменной печи ( $Q_n$ ).

Аналитическое выражение для определения этого расчетного обобщенного параметра ( $Q_p$ ) по технологической информации о ходе и условиях плавки целесообразно представить в виде зависимости [17, 25, 79, 80]:

$$\begin{aligned} Q_p = Q_n = q_r/P + Q_{ш} - 31750 [\text{Fe}]r_d - Q_n = \\ = \sum q_i[X]_i + c_q t_q + c_{ш} t_{ш} U + Q_{\phi}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

где  $[X]_i$  — содержание  $i$ -го элемента (например, [Si], [Mn], [P]) в чугуне, %;

$q_i$  — тепловой эффект реакции восстановления  $i$ -го элемента, кДж/10 кг элемента (например,  $q_{\text{Si}} = 26500$ ,  $q_{\text{Mn}} = 52250$  и т. п.).

Успешное решение любой технологической задачи возможно только в том случае, если она рассматривается как системная задача, то есть учитывает не только взаимосвязи, присущие различным физико-химическим процессам, но и информационную структуру управляемой технологической системы. При этом зашумленность информации не должна искажать результаты моделирования, что достигается за счет использования принципов построения помехозащищенных математических моделей. Один из них заключается в выборе такой структуры модели, в которой наименее достоверные данные используются таким образом, что ошибки, вызванные этими данными, не приводят к существенным погрешностям результатов моделирования. То есть заданные требования к представительности оценки могут быть достигнуты с помощью различных структур вычисления [17, 20, 34, 35, 123, 130—134].

Так, необходимые для решения уравнения теплового баланса нижней зоны доменной печи значения производительности ( $P$ ) и степени прямого восстановления железа ( $r_d$ ) могут быть найдены различными способами. Самая простая методика расчета величины  $P$  основана на использовании информации об интенсивности загрузки шихтовых материалов и их химическом составе (балансе железа). Для вычислений можно использовать следующую формулу:

$$P = e_n/\tau_n, \quad (2.9)$$

где  $e_n$  — теоретический выход чугуна из подачи, т/подачу;

$\tau_n$  — интервал времени между очередными подачами, мин.

Анализ рассчитанных данных показал, что надежные результаты можно получить лишь при стабильном уровне засыпи, соблюдении графика выпусков и ровном ходе шихтовых материалов, поэтому применение формулы (2.9) весьма ограничено.

Более пригодны для решения задач прогнозирования (выходная переменная определяется несколькими входными и параметрами состояния, которые в первом приближении можно принять постоянными) способы, основанные на решении других балансовых соотношений доменной плавки, и в частности, с использованием информации о параметрах комбинированного дутья, составе колошникового газа и параметрах загружаемой шихты. При этом возможен многовариантный режим расчета показателей процесса по балансу:

- кислорода;
- «углерод—кислород»;
- газифицированного углерода кокса.

*Баланс кислорода* имеет следующий вид:

$$2P\delta = V_{CO} + 2V_{CO_2} + V_{H_2O}^r - 2V_{O_2} - V_{H_2O}, \quad (2.10)$$

где  $\delta$  — количество кислорода, поступающего в печь с шихтовыми материалами, кг/т чугуна;

$V_{CO}$ ,  $V_{CO_2}$ ,  $V_{H_2O}^r$  — количество соответствующих газов, покидающих печь с колошниковым газом, определяемое по составу и выходу колошникового газа, м<sup>3</sup>/мин;

$V_{O_2}$ ,  $V_{H_2O}$  — количество кислорода и водяных паров, поступающих в печь с дутьем, м<sup>3</sup>/мин.

В левой части уравнения представлено количество кислорода, поступающего в печь с восстанавливаемыми элементами шихты, а в правой части — разница между покидающим печь с колошниковыми газами кислородом и поступающим его количеством в печь с дутьем в единицу времени.

Учтем, что

$$V_{H_2} = V_{H_2O} + (H)V_{пг}, \quad V_{O_2} = 2V_{O_2} + V_{H_2O},$$

$$V_{C\Sigma} = V_{CO} + V_{CO_2}, \quad V_{CO_2} = \eta_{CO}V_{C\Sigma}, \quad V_{H_2O}^r = \eta_{H_2}V_{H_2},$$

где  $V_{H_2}$ ,  $V_{O_2}$  — суммарное количество H<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>, поступающего в печь с комбинированным дутьем, м<sup>3</sup>/мин;

(Н) — суммарное содержание газообразного водорода в природном газе,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$V_{\text{пр}}$  — расход природного газа,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;

$V_{\text{сз}}$  — суммарное количество  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ , покидающее печь с колошниковым газом,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;

$\eta_{\text{CO}}$  — степень использования  $\text{CO}$  ( $\eta_{\text{CO}} = \text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{CO})$ ), доли;

$\eta_{\text{H}_2}$  — степень использования  $\text{H}_2$  ( $\eta_{\text{H}_2} = \text{H}_2\text{O}/(\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2)$ ), доли;  
 $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$  — содержание соответствующих компонентов в колошниковом газе, объем. %.

Тогда выражение (2.10) примет следующий вид:

$$2P\delta = V_{\text{сз}}(1 + \eta_{\text{CO}}) + \eta_{\text{H}_2}V_{\text{H}_2} - V_{\text{O}_2}. \quad (2.11)$$

*Баланс углерода* можно записать двумя способами:

Первый способ (баланс «углерод—кислород») учитывает, что общее количество углерода, покидающего печь с колошниковыми газами, образуется в результате горения углерода за счет кислорода дутья и водяных паров, а также за счет газификации углерода по реакциям прямого восстановления железа и примесей. В этом случае суммарное количество углерода, покидающего печь с колошниковым газом, определяется по следующему уравнению:

$$V_{\text{сз}} = V_{\text{O}_2} + 4[\text{Fe}]r_dP + C_{\text{эл}}P, \quad (2.12)$$

где  $C_{\text{эл}}$  — количество  $\text{CO}$ , образовавшегося от восстановления трудновосстановимых примесей,  $\text{м}^3/\text{т}$  чугуна.

Второй способ (баланс газифицированного углерода) основан на том, что количество углерода, покидающего печь с колошниковым газом, равно сумме количества газифицируемого углерода кокса и количества углерода, поступающего в печь с углеводородными добавками в дутье. В этом случае минутный баланс углерода запишется следующим образом:

$$V_{\text{сз}} = 1,867g_kP + (C)V_{\text{пр}}, \quad (2.13)$$

где  $g_k$  — удельное количество газифицированного углерода кокса, определяемое как удельный расход загружаемого в печь углерода, кокса за вычетом углерода, израсходованного на науглероживание чугуна,  $\text{кг}/\text{т}$  чугуна,

$$g_k = 0,01\text{KC}_k - 10[\text{C}]; \quad (2.13a)$$

где  $K$  — удельный расход кокса, кг/т чугуна;

$C_k$  — содержание углерода в коксе, %;

$[C]$  — содержание углерода в чугуне, %;

$(C)$  — суммарное содержание газообразного углерода в природном газе,  $m^3/m^3$ ;

$V_{пр}$  — расход природного газа,  $m^3/мин$ .

Приведенные уравнения (2.11)—(2.13) могут быть разрешены относительно необходимых для теплового баланса переменных  $P$  и  $r_d$ .

Так, выражения для расчета производительности доменной печи могут быть получены:

из уравнения (2.11)

$$P = \frac{V_{C\Sigma}(1 + \eta_{CO}) + \eta_{H_2} V_{H_2} - V_{O\Sigma}}{2\delta}; \quad (2.14)$$

из уравнения (2.12)

$$P = \frac{V_{C\Sigma} - V_{O\Sigma}}{4[Fe]r_d + C_{эл}}; \quad (2.15)$$

из системы уравнений (2.12)—(2.13)

$$P = \frac{V_{O\Sigma} - (C)V_{пр}}{1,867g_k - 4[Fe]r_d - C_{эл}}; \quad (2.16)$$

из уравнения (2.13)

$$P = \frac{V_{C\Sigma} - (C)V_{пр}}{1,867g_k}. \quad (2.17)$$

Совместное решение уравнений (2.12) и (2.13) позволило получить следующее выражение для расчета степени прямого восстановления железа, использующее информацию о параметрах дутья, шихтовых материалов и составе продуктов плавки:

$$r_d = \frac{1}{4[Fe]}(1,867g_k - V_{O\Sigma}/P + (C)V_{пр}/P - C_{эл}). \quad (2.18)$$

Степень использования восстановительного потенциала газа характеризуют также индексом косвенного восстановления  $R_r$ ,

выражающим отношение кислорода оксидов железа, отнятого непрямым путем, ко всему кислороду, связанному с оксидами железа. Обозначив количество кислорода, отнимаемого у шихты непрямым (косвенным) путем, через  $O_i$ , и прямым путем — через  $O_d$ , известное уравнение А. Н. Рамма для расчета  $R_i$  можно представить в виде

$$R_i = O_i / (O_i + O_d). \quad (2.19)$$

Индекс косвенного восстановления, используя соотношения (2.10) и (2.11), можно представить через степени использования газов  $\eta_{CO}$ ,  $\eta_{H_2}$  и производительность печи:

$$R_i = V_{CZ} / (2P\delta)\eta_{CO} + V_{H_2O} / (2P\delta)\eta_{H_2}. \quad (2.20)$$

Расчет по данному уравнению, в отличие от уравнения (2.19), осуществляется с использованием информации о составе колошникового газа.

С физической точки зрения все эти методы расчета совершенно равнозначны, но их применение для анализа реальных условий работы печи, когда установившееся состояние процесса практически недостижимо, а влияние неконтролируемых воздействий и помех существенно, дает различные результаты расчета.

Анализ информационной структуры уравнений (2.11)—(2.13) показал, что каждая из методик расчета имеет свои преимущества и недостатки.

*Методика расчета, основанная на балансе газифицированного кислорода шихты (уравнение (2.11)),* использует в полном объеме информацию о параметрах комбинированного дутья, составе железорудных материалов, составе колошникового газа. Имеет высокую чувствительность к параметрам комбинированного дутья и окисленности железорудных материалов, составу колошникового газа. Ее целесообразно использовать при низкой достоверности информации о массах загруженных железорудных материалов и кокса.

*Баланс «углерод—кислород» (уравнение (2.12))* описывает процесс газификации углерода кокса, протекающий в области высоких температур. В полной мере используется информация о параметрах комбинированного дутья и количестве загружаемого кокса. В меньшей степени используется информация о составе колошникового газа — только для расчета производительности



сти печи. Исключается из анализа информация о содержании водорода в колошниковом газе. Ее целесообразно использовать при низкой достоверности информации о составе колошниково-го газа.

*Баланс газифицированного углерода кокса (уравнение (2.13)).* Положенная в основу методики расчета система уравнений максимально использует информацию о составе колошниково-го газа, расходах кокса, природного газа. Методика имеет высокую чувствительность к составу шихты, общему количеству и соотношению СО и СО<sub>2</sub> в колошниковом газе, содержанию Н<sub>2</sub>. Ее целесообразно применять при низкой достоверности данных о параметрах комбинированного дутья.

Другие составляющие теплового баланса нижней зоны доменной печи определяются составом шихты, химическим составом шихтовых материалов и продуктов плавки и рассчитываются по материальным балансам.

Так, балансы шлакообразующих и баланс оксида кальция позволяют получить также различные оценки выхода шлака, отличающиеся информацией о химическом составе компонентов шихты и составе продуктов плавки.

Выход шлака ( $U$ , т/т чугуна), рассчитанный из баланса шлакообразующих элементов, рассчитывают по уравнению

$$U = \left\{ 0,01 \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^n M_i X_{O_{ij}} \right) + 0,01 \sum_{k=1}^l \left( \sum_{i=1}^n M_i X_{ik} \right) (1 - \eta_{il}) - \right. \\ \left. - 0,0214e[\text{Si}] \right\} / e, \quad (2.21)$$

где  $M_i$  — масса  $i$ -го компонента доменной шихты, т;

$X_{O_{ij}}$  — содержание  $j$ -го шлакообразующего элемента в  $i$ -м компоненте доменной шихты, %;

$X_{ik}$  — содержание  $k$ -го элемента в  $i$ -м компоненте доменной шихты, %;

$\eta_{il}$  — степень перехода  $k$ -го элемента в чугун, доли единиц;

$e$  — теоретический выход чугуна, т.

При наличии информации в  $i$ -м компоненте шихты о содержании железа ( $\text{Fe}_i$ , вес. %) и кислорода ( $\text{O}_i^{\text{ш}}$ , вес. %), связанного с

восстанавливаемыми в чугуны оксидами железа, выход шлака можно рассчитать по следующему уравнению:

$$U = \left\{ 0,01 \sum_{i=1}^n M_i (100 - \text{Fe}_i - \text{O}_i^{\text{III}}) - 0,0214e[\text{Si}] \right\} / e. \quad (2.22)$$

Выход шлака, рассчитанный по балансу оксида кальция:

$$U = \sum_{i=1}^n (M_i \text{CaO}_i) / [e(\text{CaO})], \quad (2.23)$$

где  $\text{CaO}_i$ ,  $(\text{CaO})$  — содержание  $\text{CaO}$  в  $i$ -м железорудном материале и шлаке соответственно, %.

Таким образом, представленные системы уравнений используют разные группы информации о процессе, полученные значения показателей доменной плавки являются оценками их действительных значений. Различие оценок связано с разной достоверностью используемой информации. При этом надежной следует считать ту оценку, которая получена с использованием более достоверной информации. В связи с этим модель, используемая для решения технологических задач с привлечением практических данных, должна иметь переменную структуру, обеспечивающую использование разных групп информации в зависимости от ее достоверности.

Известно, что балансовые уравнения есть не что иное, как форма записи законов сохранения вещества и энергии, и они могут успешно использоваться для анализа статики процесса, то есть для условий, когда нет переходных процессов и связанных с ними аккумуляции в системе вещества и энергии. В описанных выше уравнениях приходится использовать переменные, принадлежащие различным интервалам времени. Например, в уравнение (2.13) входят переменная  $g_k$ , определяемая по параметрам загружаемой на колошнике шихты, и  $V_{\text{ОС}}$ , определяемая по измеренным в текущий момент расходу и составу комбинированного дутья. Очевидно, что использование балансовых соотношений приведет к появлению существенных погрешностей. Для снижения погрешностей решения балансовых соотношений, как уже отмечалось ранее, используется натурно-модельный подход, сущность которого заключается в оценке изменения входных и выходных переменных относительно базовых значений.

Здесь и далее под базовыми значениями величины понимаются значения, найденные за такой период усреднения информации, при котором влияния динамических погрешностей несущественно. Иными словами, под базовой составляющей понимается информация, усредненная на таком интервале времени, на котором ошибки, связанные с переходными процессами, сказываются незначительно на результатах расчета.

При натурно-модельном подходе оценка прогнозных значений выходных переменных получается в результате решения линейаризованных балансовых соотношений путем разложения скалярной функции  $Y$  нескольких переменных  $X = (X_1, \dots, X_i, \dots, X_n)$  на интервале  $\Delta X = (\Delta X_1, \dots, \Delta X_i, \dots, \Delta X_n)$  в окрестностях некоторой точки  $X_0 = (X_{10}, \dots, X_{i0}, \dots, X_{n0})$ , характерной для базового состояния, в ряд Тейлора и в последующем учете только первых членов этого ряда по каждому из аргументов.

$$Y(X) = Y(X_0) + \sum \partial Y / \partial X_i |_{X=X_0} (X_i - X_{i0}) \quad (2.24)$$

$$\text{или } \Delta Y = \sum k_i \Delta X_i, \quad (2.25)$$

где  $\Delta X_i$  — отклонение  $i$ -го параметра процесса  $X_i$  от его базового значения  $X_{i0}$ ,  $\Delta X_i = X_i - X_{i0}$ .

Например, для функции вида  $Y = \sum (k_i X_i)$  линейаризованное уравнение принимает следующий вид:  $\Delta Y = \sum (k_i \Delta X_i)$ , а для уравнения типа  $Y = \Pi(k_i X_{ji} X_{ji}) - \Delta Y / Y = \sum (k_i \Delta X_{ji} / X_{ji})$ .

Использование линейаризованных зависимостей и принципа аддитивности влияния отдельных режимных параметров позволяет анализировать только относительно небольшие отклонения режимных параметров от их базового уровня.

В рамках задачи анализа работы доменной печи линейаризованное уравнение (2.8) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\kappa} = \Delta Q_p = q_r / P (\Delta q_r / q_r) - q_r / P (\Delta P / P) + \Delta Q_{\text{ш}} - 31750 [\text{Fe}] \Delta r_d - \\ - \Delta Q_{\text{п}} - \Delta Q_{\text{ф}} - t_{\text{ш}} c_{\text{ш}} \Delta U = \sum q_i \Delta [X]_i + \Delta t_q c_q + \Delta t_{\text{ш}} c_{\text{ш}} U. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Правая часть уравнения (2.26) отражает изменения состава чугуна и физического нагрева продуктов плавки. Значения  $\Delta t_q$ ,  $\Delta t_{\text{ш}}$ ,  $\Delta [X]_i$  определяются как отклонения значений соответствующих величин в сопоставимом периоде от их базовых значений (например,  $\Delta [X]_i = [X]_{i0} - [X]_i$ ).

Входящие в левую часть уравнения переменные  $\Delta r_d$  и  $\Delta P / P$  определяются из балансовых соотношений, связывающих пара-

метры дутья и загружаемой шихты с количеством газов-восстановителей и степенью использования восстановительной работы газового потока.

При допущении, что  $\Delta r_d = -\Delta R_i$ , после линеаризации уравнения (2.20) получим выражение для расчета изменения степени прямого восстановления железа:

$$\Delta r_d = -V_{\text{сз}}/(2P\delta)\Delta\eta_{\text{CO}} - V_{\text{нз}}/(2P\delta)\Delta\eta_{\text{H}_2} - \eta_{\text{CO}}/(2P\delta)\Delta V_{\text{сз}} - \eta_{\text{H}_2}/(2P\delta)\Delta V_{\text{нз}} + R_i\Delta P/P. \quad (2.27)$$

Линеаризованное уравнение (2.16) для расчета производительности доменной печи примет следующий вид:

$$\Delta P/P = (\Delta V_{\text{O}_2} - (C)\Delta V_{\text{пг}})/(V_{\text{O}_2} - (C)V_{\text{пг}}) - (1,867\Delta g_k - 4[\text{Fe}]\Delta r_d - \Delta C_{\text{эл}})/(1,867g_k - 4[\text{Fe}]r_d - C_{\text{эл}}). \quad (2.28)$$

Аналогичным образом осуществляется линеаризация и остальных уравнений модели.

Таким образом, решение системы линеаризованных уравнений совместно с уравнением теплового баланса позволяет оценить влияние изменения режимных параметров на показатели доменной плавки.

Общие принципы, используемые при построении алгоритма решения какой-либо задачи, заключаются в следующем:

1) выявляются доминирующие связи, и на начальном этапе расчета отбрасываются переменные, влияние которых на результат расчета малозначимо;

2) организуется итерационная процедура для учета связей малого порядка. При этом заданная точность моделирования определяется с учетом технологической возможности изменения режимных параметров или реальной погрешности измерения контролируемых переменных;

3) результаты моделирования подвергаются комплексной оценке с учетом изменения теплового состояния верхней и нижней зон доменной печи, газодинамики отдельных зон печи, шлакового режима, технологических возможностей загрузки материалов и отработки продуктов плавки.

Проиллюстрируем эту процедуру на примере расчета требуемого изменения массы кокса в подаче при изменении состава или соотношения компонентов железорудных материалов в подаче в проектный период относительно базового.

Процедура включает следующую последовательность вычислений:

- расчет теплового эквивалента кокса;
- расчет требуемого изменения количества тепла в нижней зоне доменной печи при изменении параметров шихты;
- расчет влияния параметров шихты на расход кокса.

Блок-схема алгоритма решения задачи приведена на рис. 2.4.

*Расчет теплового эквивалента кокса*

Итерационная процедура расчета теплового эквивалента кокса представлена на рис. 2.5 и заключается в следующем.

1. Задается изменение удельного расхода кокса  $\Delta K$ , например 1 кг/т чугуна.
2. Рассчитывается изменение удельного количества газифицированного углерода кокса ( $g_k$ ):

$$\Delta g_k = C_k \Delta K. \quad (2.29)$$

3. Определяются первые приближения относительных изменений количества  $CO(\Delta V_{CY}/V_{CY})$  и производительности  $(\Delta P/P)$  по уравнениям, полученным в результате линеаризации зависимостей (2.12) и (2.16) при условии постоянства всех параметров за исключением  $g_k(\Delta V_{II} = 0, \Delta r_d = 0, \Delta V_{O\Sigma} = 0, \Delta C_{\Sigma n} = 0)$ :

$$\begin{aligned} \Delta V_{CY}/V_{CY} = & -\Delta g_k/g_k (1 - 1,867g_k/(1,867g_k - \\ & - 4[Fe]r_d + C_{\Sigma n})), \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\Delta P/P = -1,867\Delta g_k/(1,867g_k - 4[Fe]r_d + C_{\Sigma n}). \quad (2.31)$$

4. Осуществляется расчет  $\Delta r_d$ ,  $\Delta V_{CY}/V_{CY}$  и  $\Delta P/P$  с учетом изменения восстановительной работы газового потока при найденном значении  $\Delta V_{CY}/V_{CY}$  при условии, что  $\Delta \eta_{CO} = 0, \Delta \eta_{H_2} = 0, \Delta V_{H_2} = 0$ . Линеаризованные уравнения (2.20), (2.12) и (2.16) для этого случая примут следующий вид:

$$\Delta r_d = -\eta_{CO}/(2P\delta)\Delta V_{CY} + R_i\Delta P/P, \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_{CY}/\Delta V_{CY} = & -\Delta g_k/g_k (1 - 1,867g_k/(1,867g_k - \\ & - [Fe]r_d + C_{\Sigma n})) + (4[Fe]\Delta r_d)/(4[Fe]r_d + C_{\Sigma n}), \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\Delta P/P = -(1,867\Delta g_k - 4[Fe]\Delta r_d)/(1,867g_k - 4[Fe]r_d + C_{\Sigma n}). \quad (2.34)$$

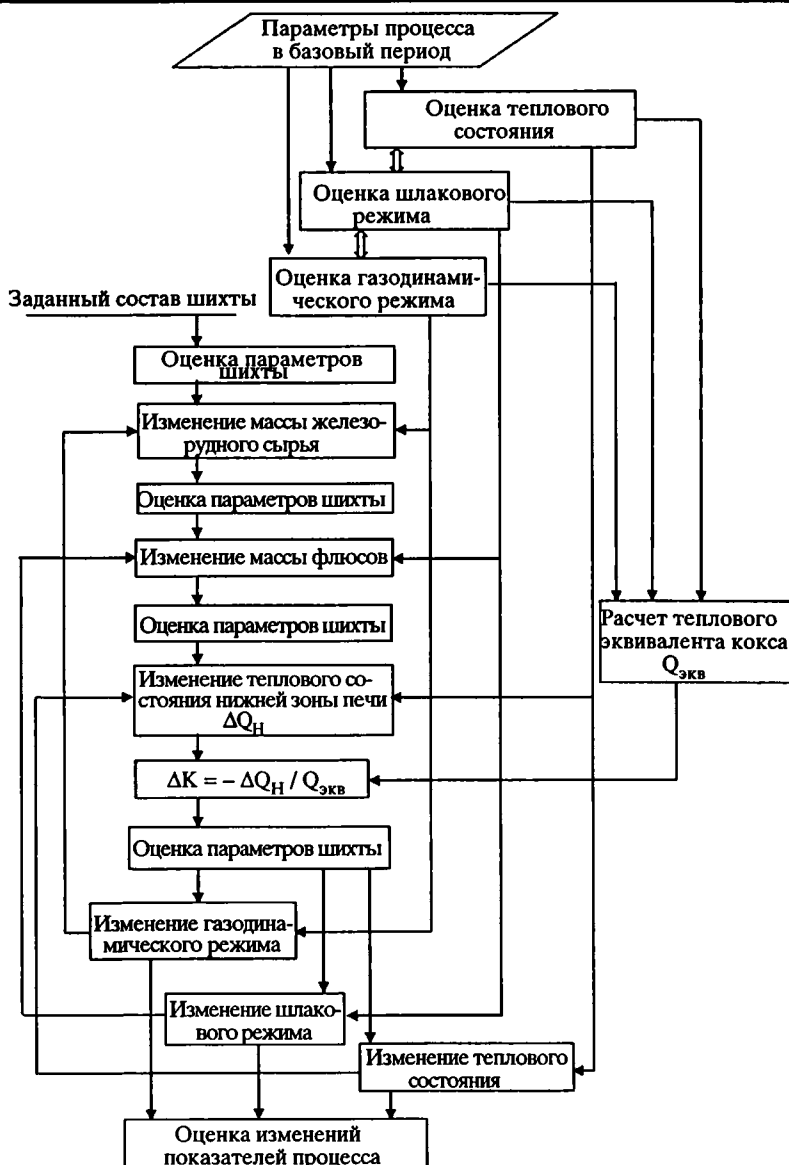


Рис. 2.4. Блок-схема алгоритма решения задач расчета требуемого изменения массы кокса при изменении состава соотношения компонентов железорудного сырья



Рис. 2.5. Итерационная процедура расчета теплового эквивалента кокса

Для решения данной системы трех уравнений осуществляется итерация до достижения допустимой невязки определения одного или нескольких из этих параметров.

5. Выполняется расчет изменения удельного выхода шлака за счет золы кокса по уравнению, полученному в результате линеаризации зависимости (2.22)

$$\Delta U = 0,0001 \Delta K A^k (100 - (112/160) \text{Fe}_2\text{O}_3^{A^k}), \quad (2.35)$$

где  $A^k$  — содержание золы в коксе, %;

$\text{Fe}_2\text{O}_3^{A^k}$  — содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в золе кокса, %.

6. В заключение рассчитывается тепловой эквивалент кокса, т. е. изменение удельных затрат тепла в нижней части печи при изменении удельного расхода кокса на 1 кг/т чугуна по уравнению (2.26), которое при условии  $\Delta q_r = 0$ ,  $\Delta Q_{\text{ш}} = 0$ ,  $\Delta Q_{\text{п}} = 0$ ,  $\Delta Q_{\text{ф}} = 0$  примет следующий вид:

$$Q_{\text{эк}} = -q_r/P (\Delta P/P) - 31750 [\text{Fe}] \Delta r_d - c_{\text{ш}} \Delta U. \quad (2.36)$$

В реальных условиях доменной плавки тепловой эквивалент кокса меняется в достаточно широких пределах. Например, для условий работы доменных печей ОАО ММК тепловой эквивалент кокса составляет 11000—12000 кДж, для плавки литейных чугунов в условиях малых доменных печей Урала 9500—11000 кДж, а при выплавке доменного ферромарганца 7000—8000 кДж.

Сам по себе показатель «тепловой эквивалент кокса» весьма интересен при анализе работы доменных печей. Численное значение данного показателя характеризует совершенство технологии. Чем выше степень использования монооксида углерода, больше содержание железа в рудной части шихты и выше содержание кислорода в дутье, тем выше тепловой эквивалент кокса. С другой стороны, чем выше тепловой эквивалент кокса, тем более значимо сказываются на тепловом состоянии доменной печи неконтролируемые возмущения. Этот факт говорит о том, что при анализе работы доменных печей необходимо решать задачу оценки допустимого колебания режимных параметров. Кроме содержания железа в рудной части шихты, на тепловой эквивалент кокса оказывают влияние параметры комбинированного дутья и восстановительная работа газового потока. Расчетный анализ зависимости теплового эквивалента кокса от условий плавки показал, что одинаковые мероприятия, направленные на снижение удельного расхода кокса, приводят к различным изменениям теплового эквивалента кокса (табл. 2.1).



Таблица 2.1

**Влияние условий плавки на изменение теплового эквивалента кокса**

Изменение условий плавки, обеспечивающих снижение удельного расхода кокса на 10 кг/т чугуна	Изменение теплового эквивалента кокса, кДж/кг кокса
Повышение содержания железа в рудной части шихты	3428
Увеличение температуры дутья	2351
Увеличение расхода природного газа	2916
Снижение содержания кремния в чугуне	3914
Совместное изменение расхода природного газа и содержания кислорода в дутье при условии постоянства теоретической температуры горения	2684
Совместное изменение расхода природного газа и содержания кислорода в дутье при условии постоянства теоретической температуры горения	2241
Увеличение степени использования CO	3176

*Расчет требуемого изменения количества тепла в нижней зоне доменной печи*

Требуемое количество тепла в нижней зоне доменной печи определяется с учетом необходимого изменения количества флюсов или соотношения компонентов железорудной части шихты, загружаемых в печь для получения заданной основности шлака. В интерактивном режиме может быть реализован вариант расчета, предусматривающий определение количества флюсов с учетом шлакового и газодинамического режимов доменной плавки.

Последовательность вычислений сводится к следующему:

1. Определяется средневзвешенный состав железорудных материалов и флюсов в подаче в базовом периоде.
2. Определяется средневзвешенный состав железорудных материалов в подаче в прогнозном периоде.
3. Рассчитывается по балансу железа теоретический выход чугуна из подачи ( $e_n$ ) для базового и прогнозного периодов.
4. Рассчитывается требуемое изменение массы флюсов или соотношения компонентов железорудной части шихты в подаче при условии постоянного расхода кокса.
5. Рассчитывается изменение выхода шлака, например по соотношениям (2.21), (2.22).

6. Определяется избыток (дефицит) тепла в нижней зоне доменной печи при изменении количества шлака и флюсов:

$$\Delta Q_n = \Delta Q_{ш} - \Delta Q_{фл} - t_{ш} c_{ш} \Delta U. \quad (2.37)$$

7. Рассчитывается необходимый дополнительный расход кокса:

$$\Delta K = -\Delta Q_n / Q_{ЭК}. \quad (2.38)$$

8. Рассчитывается необходимое количество кокса в подаче ( $M_k$ ):

$$M_k = (\Delta K + K) e_n, \quad (2.39)$$

где  $e$  — теоретический выход чугуна из подачи, т.

9. Рассчитывается дополнительное количество флюсов на ошлакование золы кокса.

Далее осуществляются итерации до достижения заданной точности вычисления требуемого количества тепла в нижней зоне доменной печи или требуемого расхода кокса (пункты 3—9).

10. Рассчитывается изменение затрат тепла в нижней зоне печи  $\Delta Q_n$  по уравнению (2.26), включающему определение  $\Delta r_d$  и  $\Delta P/P$  по уравнениям (2.27) и (2.28).

*Расчет влияния параметров шихты на расход кокса*

Изменения удельного расхода кокса и массы кокса в подаче при изменении параметров шихты рассчитываются по уравнениям (2.38), (2.39).

Возможность математической модели теплового состояния оценивать влияние на показатели процесса любых параметров плавки позволяет рассчитать минимальный для данных сырьевых условий удельный расход кокса [135].

Под минимально возможным удельным расходом кокса понимается такой удельный расход кокса, которого можно было бы достигнуть при условии термодинамического равновесия реакции восстановления вюстита монооксидом углерода при температурах развития реакций прямого восстановления.

Расчет минимального расхода кокса состоит в следующем:

1. По составу колошниковых газов с учетом реального химического состава шихтовых материалов оценивается степень использования восстановительной работы газового потока для реакции прямого восстановления железа ( $\eta_{CO}^{пр}$ ) и ее отклонение от равновесных значений, определяемых по диаграмме Fe—C—O ( $\Delta \eta_{CO}$ ):

$$\Delta \eta_{CO} = \eta_{CO}^{пр} - \eta_{CO}^{равн}. \quad (2.40)$$

- По уравнениям (2.26)—(2.28) рассчитывается изменение теплового состояния низа печи за счет этого данного фактора ( $\Delta Q_{\text{н}}^{\Delta \eta \text{co}}$ ) и соответствующее этому изменению удельного расхода кокса:

$$\Delta K = -\Delta Q_{\text{н}}^{\Delta \eta \text{co}} / Q_{\text{эк}}. \quad (2.41)$$

- Минимально возможный удельный расход кокса рассчитывается по уравнению

$$K_{\text{min}} = K_{\text{факт}} - \Delta K. \quad (2.42)$$

Сопоставление значений минимального и фактического расходов кокса дает информацию о возможных резервах производства.

Адекватность разработанной модели теплового состояния подтверждается сопоставлением модельных оценок изменения удельного расхода кокса с отчетными данными о работе доменных печей. Анализировались данные о работе доменных печей НЛМК, ММК, НТМК, ЧерМК, ЗСМК за 1998—1999 гг. Всего проанализировано более 100 сопоставимых периодов. Результаты сопоставления расчетного по модели и фактического изменения удельного расхода кокса приведены на рис. 2.6.

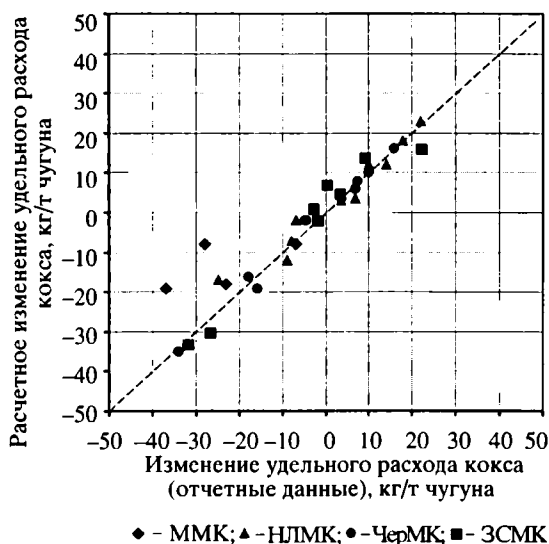


Рис. 2.6. Результаты сопоставления расчетных и отчетных данных об изменении удельного расхода кокса

### 2.3. Подсистема дутьевого и газодинамического режимов доменной плавки ( $S_2$ )

Следует отметить, что наилучшие показатели доменной плавки — высокую производительность и низкий удельный расход кокса — можно получить только при благоприятном сочетании развития как физико-химических, так и физико-механических процессов.

В последнее время вследствие использования рудного материала сравнительно высокого качества и высоких параметров комбинированного дутья (высокий нагрев дутья, применение дутья, обогащенного кислородом, подача в горн печи углеводородных добавок) лимитирующим процессом часто является движение шихты и газа в печи.

Целью моделирования дутьевого и газодинамического режимов доменной плавки является оценка влияния параметров комбинированного дутья и загружаемой шихты на параметры фурменного очага и перепады давления в отдельных зонах доменной печи. Структура данной подсистемы представлена на рис. 2.7.

Так, в результате расчета по уравнениям (2.9), (2.14), (2.15) и другим изменение производительности печи найдено при условии постоянства расхода дутья и в значительной степени не учитывает изменение выхода газов, а следовательно, газодинамику процесса. При реальных условиях, например при изменении содержания кислорода в дутье, выход газов увеличивается, так как один кубический метр кислорода при горении на фурмах дает два кубометра монооксида углерода. Поэтому для правильной прогнозной оценки изменения производительности печи должна производиться и прогнозная оценка газодинамики доменного процесса.

#### *Дутьевой режим*

Размеры фурменного очага (понимаем под этим прежде всего протяженность циркуляционной зоны, а также размеры кислородной и углекислотной зон горения) оказывают существенное влияние практически на все процессы, происходящие в доменной печи. Расчет характеристик фурменного очага, построенный на использовании эмпирических зависимостей, позволяет оценить протяженность циркуляционной, окислительной зон, относительную площадь окислительных зон в базовом периоде и их изменения при колебаниях условий плавки.

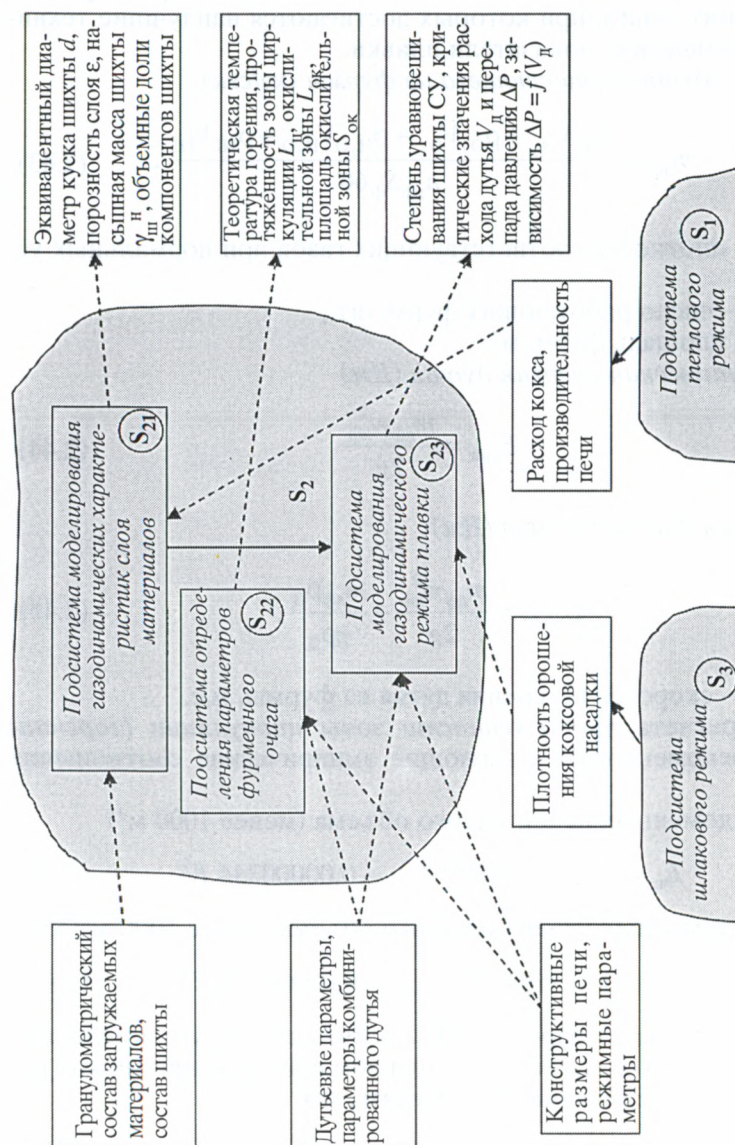


Рис. 2.7. Структура подсистем дутьевого и газодинамического режимов

При этом по результатам анализа работы конкретной доменной печи определяются такие области значений характеристик фурменного очага, при которых достигаются наилучшие технико-экономические показатели плавки.

*Масса дутья истекающего из фурмы (кг/сек)*

$$m_{\text{дф}} = \frac{\rho_{\text{N}_2} V_{\text{N}_2} + \rho_{\text{O}_2} V_{\text{O}_2} + \rho_{\text{H}_2\text{O}} V_{\text{H}_2\text{O}} + \rho_{\text{пг}} V_{\text{пг}}}{n_{\text{рф}} S_{\text{ф}} 60}, \quad (2.43)$$

где  $\rho_i$  — плотность соответствующих газов при нормальных условиях;

$n_{\text{рф}}$  — число работающих фурм, шт.;

$S_{\text{ф}}$  — площадь фурм, м<sup>2</sup>.

*Кинетическая энергия дутья (Дж)*

$$E_{\text{кин}} = \frac{m_{\text{дф}} w_{\text{дф}}^2}{2g}. \quad (2.44)$$

*Полная энергия дутья (Дж)*

$$E_{\text{полн}} = \frac{m_{\text{дф}} w_{\text{дф}}^2}{2g} + \frac{m_{\text{дф}} \rho_{\text{д}}}{g \rho_{\text{д}}}, \quad (2.45)$$

где  $w_{\text{дф}}$  — скорость истечения дутья из фурмы, м/с.

Для расчета *протяженности зоны циркуляции (горения)* можно рекомендовать следующие эмпирические соотношения [17], мм:

- для доменных печей малого объема (менее 1000 м<sup>3</sup>)

$$L_{\text{ц}} = 122,26 + 0,329 E_{\text{кин}} - 0,00000244 E^2, \quad (2.46)$$

- для доменных печей большого объема (более 1000 м<sup>3</sup>) [17]

$$L_{\text{ц}} = -806,1 + 0,0284 E_{\text{полн}} - 0,00000001 E_{\text{полн}}^2. \quad (2.47)$$

Для расчетного определения протяженности углекислотной (окислительной) зоны горения в первом приближении можно рекомендовать следующую взаимосвязь, мм:

$$L_{\text{ок}} = 1,28 L_{\text{ц}}. \quad (2.48)$$

Площадь окислительных зон фурменного очага, отнесенная к поперечному сечению горна, %:

$$S_{\text{ок}} = 0,9n_{\text{рф}} \left( \frac{0,001L_{\text{ок}}}{d_{\Gamma}} \right)^2 100, \quad (2.49)$$

где  $d_{\Gamma}$  — диаметр горна, м.

Необходимо отметить, что оптимальные значения параметров фурменного очага определяются как результат длительного анализа работы доменных печей. Например, для доменных печей малого объема наилучшие показатели работы печи достигаются при условии, когда площадь, занятая фурменными очагами, составляет 30—35 % площади горна печи.

При оценке эффективности того или иного изменения режимных параметров доменной плавки определяются прогнозные значения изменений параметров фурменного очага и оценивается допустимость рассматриваемых мероприятий.

#### *Газодинамический режим*

При моделировании газодинамического режима доменной плавки необходимо выполнить:

- расчет газодинамических характеристик слоя шихтовых материалов;
- оценку изменения перепадов давления и степени уравнивания шихты в отдельных зонах печи при изменении расхода дутья;
- оценку изменения перепадов давления и степени уравнивания шихты в отдельных зонах печи при изменении параметров загружаемой шихты.

#### *Определение газодинамических характеристик столба шихтовых материалов в базовом периоде доменной плавки*

Как известно, для непрерывного схода шихты в печи необходимо выполнение следующего условия в соотношении сил, управляющих движением материалов:

$$P_{\text{ш}} > P_{\Gamma} + F_{\text{тр}}, \quad (2.50)$$

где  $P_{\text{ш}}$  — масса шихты в печи;

$P_{\Gamma}$  — подъемная сила газового потока;

$F_{\text{тр}}$  — силы трения материалов о стенки печи.

В том случае, когда указанное неравенство превращается в равенство, шихта в печи не движется — наступает явление под-

висания. В этом случае возникает необходимость принятия мер по возобновлению движения материалов.

Рассмотрим за счет изменения каких из указанных сил возможно управлять движением материалов в доменной печи.

Масса шихты в печи ( $P_{\text{ш}}$ ) может быть определена из простого уравнения:

$$P_{\text{ш}} = V_0 \gamma_{\text{н}}^{\text{ш}}, \quad (2.51)$$

где  $V_0$  — полезный объем печи,  $\text{м}^3$ ;  
 $\gamma_{\text{н}}^{\text{ш}}$  — насыпная масса шихты,  $\text{т}/\text{м}^3$ .

Однако направленное управление сходом шихты в печи за счет изменения массы шихты в печи невозможно, поскольку объем печи задан, а насыпная масса шихты, зависящая от соотношения рудных материалов и кокса, определяется не физическими, а физико-химическими и тепловыми процессами и также вполне определена.

Невозможно и управление силой трения материалов о стенки печи, зависящей от бокового давления материалов на ограждающие стенки и коэффициента трения столба материалов об огнеупорную кладку.

Подъемная сила газового потока может быть найдена из уравнения

$$P_{\Gamma} = \Delta P S, \quad (2.52)$$

где  $\Delta P$  — перепад давления газов при его движении через слой шихты,  $\text{Па}$ ;

$S$  — площадь поперечного сечения печи,  $\text{м}^2$ .

Для осуществления движения шихты в печи в случае ее подвигания необходимо снижать значение  $\Delta P$ , для чего нужно знать зависимость перепада давления газов от параметров шихты, газа, а также характер взаимодействия между этими потоками.

В основе моделирования процессов газодинамики лежит уравнение Эгона, позволяющее оценить влияние параметров шихты, газа и характера взаимодействия между этими потоками [75, 120]:

$$\Delta P = \lambda \frac{W^2}{2} \rho \frac{H}{d_{\text{э}}} \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \frac{T}{273} \frac{1}{(1+P_{\Gamma})}, \quad (2.53)$$

где  $\lambda$  — коэффициент, учитывающий форму и шероховатость частиц слоя;



$W$  — скорость фильтрации газового потока;

$\rho$  — плотность газа;

$H$  — высота слоя шихты в печи;

$d_3$  — эквивалентный диаметр куска шихты;

$\varepsilon$  — порозность слоя шихты;

$T$  — температура газа;

$P_{\Gamma}$  — избыточное давление газа.

Нарушение в сходе шихты в печи начинается далеко до полного уравнивания ее газовым потоком. В качестве критерия устойчивости слоя шихты в печи при воздействии на него газового потока принимается степень уравнивания (СУ) шихты газом:

$$СУ = \frac{10\Delta P}{H_A \gamma_H^{\text{III}}}, \quad (2.54)$$

где СУ — степень уравнивания шихты газовым потоком, доли ед.;

$H_A$  — высота «активной» части слоя шихты (высота слоя шихты от уровня воздушных фурм до уровня шихты в печи), м;

$\Delta P$  — перепад давления газов по высоте «активной» части слоя шихты, кг/см<sup>2</sup> (атм);

$\gamma_H^{\text{III}}$  — насыпная масса шихты, т/м<sup>3</sup>.

Как показывает практика, при достижении значения СУ = 55—60 % наступает изменение в сходе шихтовых материалов: вместо плавного движения наступает режим неровного схода материалов с появлением внутри слоя локальных разрыхлений и пустот, в которых развивается явление разделения шихты на отдельные составляющие согласно их крупности и плотности. Таким образом, происходит нарушение установленного при загрузке значения рудной нагрузки (отношение массы рудного материала к массе кокса) с развитием похолодания доменной плавки вследствие прихода в нижнюю часть печи материалов с увеличенной рудной нагрузкой.

Требуется определить зависимости сопротивления слоя шихты в печи от количества дутья, подаваемого в печь в базовом варианте плавки, с дальнейшим определением критических значений перепада давления и соответствующего этому расхода дутья, превышение которых сопровождается нарушением в сходе шихты и снижением технических показателей плавки. Поскольку предлагается наиболее полное описание входящих в уравнение (2.53) параметров газа и шихты, то по-

является возможность сравнения прогнозных изменений в газодинамическом режиме доменной плавки относительно базового варианта.

Блок-схема моделирования газодинамического режима представлена на рис. 2.8.

Поскольку из общего значения перепада давления газа по высоте слоя доменной шихты на нижнюю зону печи приходится (по имеющимся литературным данным) примерно 70 % из-за протекания в этой зоне процесса шлакообразования и в значительной степени определяющей газодинамическую напряженность слоя шихты в печи в целом, то задача описания газодинамических закономерностей слоя шихты в печи выполнялась раздельно для нижней и верхней частей слоя шихты.

Моделирование газодинамического режима нижней части (при температуре газа более 1000 °С) осуществляется в следующей последовательности:

- рассчитываются выход, состав горнового газа и теоретическая температура горения;
- рассчитывается состав газа на горизонте 1000 °С. Определяются количество монооксида углерода, получающегося при прямом восстановлении оксидов железа, марганца, кремния, фосфора, а также монооксид углерода, образующийся при процессе десульфурации чугуна. Рассчитывается объем водорода в этом температурном интервале по степени использования водорода, определенной по эмпирическим зависимостям;
- рассчитываются два параметра, определяющие перепад давления в нижней зоне доменной печи, — плотность газа и скорость его фильтрации;
- рассчитываются теплоемкость газа и температура в зоне как среднеарифметическое значение между теоретической температурой горения на фурмах и 1000°С;
- при отсутствии измерений нижнего перепада давления газов по высоте слоя шихты он определяется следующим образом:

$$\Delta P_{\text{н}} = \alpha(P_{\text{д}} - P_{\text{кг}}), \quad (2.55)$$

где  $\alpha$  — доля нижнего перепада давления газов от общего, доли ед.;

$P_{\text{д}}$  — избыточное давление горячего дутья, ати;

$P_{\text{кг}}$  — избыточное давление колошникового газа, ати;

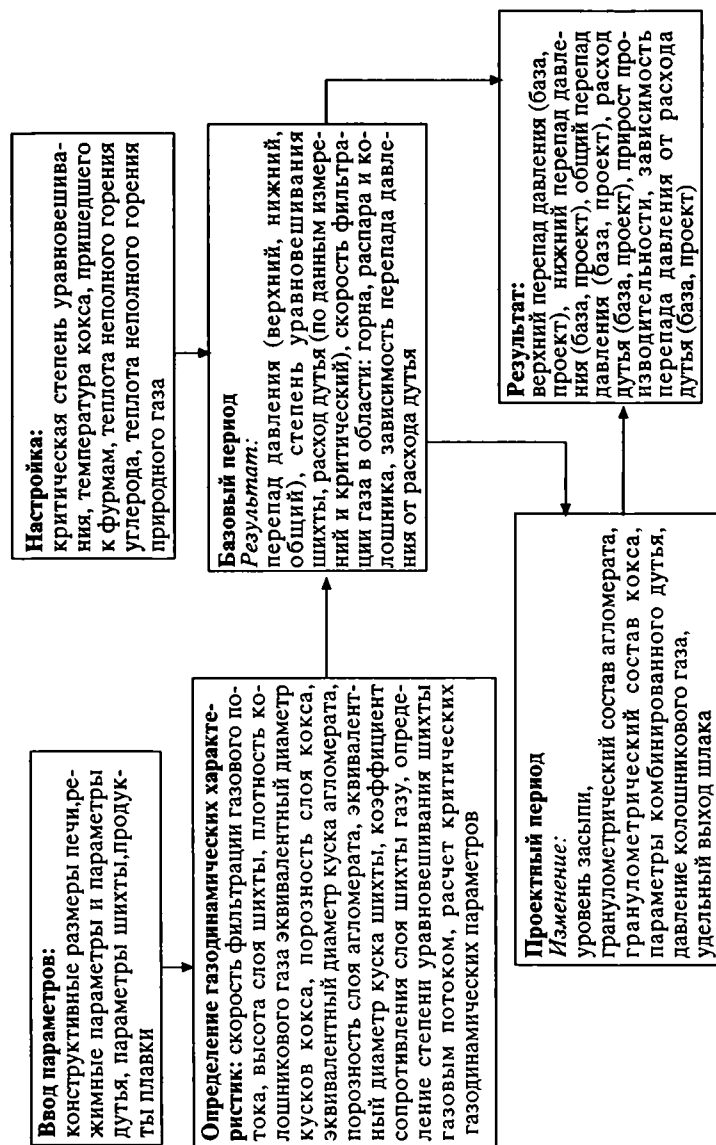


Рис. 2.8. Блок-схема моделирования газодинамического режима доменной плавки

- условно принимается, что температурная граница 1000 °С находится на стыке шахты и распара печи. К высоте нижней зоны печи нужно отнести также верхнюю часть горна (от уровня воздушных фурм до горизонта стыка горна с заплечиками, что составляет примерно 0,5 м). В этом случае высота слоя шихты в нижней зоне печи определяется следующим образом:

$$H_{\text{ш}}^{\text{н}} = h_3 + h_p + 0,5. \quad (2.56)$$

Определение входящего в уравнение (2.53) эквивалентного диаметра куска шихты производится согласно гранулометрическому составу шихты:

$$d_3 = \frac{100}{\sum \alpha_i / d_i}, \quad (2.57)$$

где  $\alpha_i$  — содержание  $i$ -й фракции в материале, %;  
 $d_i$  — средний размер  $i$ -й фракции, мм.

Порозность слоя кокса может быть рассчитана, в частности, по эмпирическому уравнению

$$\epsilon_k = 0,3(0,1d_3^k)^{0,252}, \quad (2.58)$$

- рассчитывается скорректированное значение порозности коксовой насадки (с учетом нахождения в межкусковых пространствах кокса шлака), для чего определяются:

1) удельный объем образующегося шлака:

$$V_{\text{шл}} = U_{\text{шл}} / \rho_{\text{шл}}, \quad (2.59)$$

где  $U_{\text{шл}}$  — удельный выход шлака, кг/т чугуна;

$\rho_{\text{шл}}$  — плотность шлака, кг/м<sup>3</sup>;

- 2) объем остающегося в коксовой насадке шлака, который определяется вязкостью шлака — чем она ниже, тем меньше шлака остается в слое кокса, и порозность слоя кокса будет высокой. Напротив, если шлак имеет высокую вязкость, то, оставаясь в коксовой насадке, он снижает порозность слоя кокса в зоне шлакообразования. Это обстоятельство можно учитывать вводом коэффициента  $\mu$ , учитывающего подвижность шлака. В том случае, когда образовавшийся шлак остается в зоне шлако-

образования, значение этого коэффициента равно единице. С другой стороны, при контакте железистого шлака с углеродом коксовой насадки возможно насыщение шлака газом из-за развития реакции  $(\text{FeO}) + \text{C}_\text{к} = [\text{Fe}] + \text{CO}$ , что превращает шлак в гетерогенную газошлаковую систему с ростом объема шлака. Степень гетерогенности шлакового расплава можно учесть коэффициентом  $\nu$ , значение которого в зависимости от неблагоприятного развития процессов прямого восстановления оксидов железа может достигать 5—10. С учетом вышесказанного действительный удельный объем шлака в коксовой насадке  $V'_{\text{шл}}$  ( $\text{м}^3/\text{т}$  чугуна) в общем виде рассчитывается по уравнению

$$V'_{\text{шл}} = V_{\text{шл}} \mu \nu, \quad (2.60)$$

где  $V_{\text{шл}}$  — удельный объем образующегося шлака,  $\text{м}^3/\text{т}$  чугуна;  
3) удельный объем кокса на получение 1 тонны чугуна:

$$V_\text{к} = \frac{k}{\gamma_\text{н}^\text{к}}, \quad (2.61)$$

где  $k$  — удельный расход кокса,  $\text{кг}/\text{т}$  чугуна;

$\gamma_\text{н}^\text{к}$  — насыпная масса кокса,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Удельный объем межкусковых пространств коксовой насадки:

$$V_{\text{об}} = V_\text{к} \varepsilon_\text{к}. \quad (2.62)$$

С учетом того, что часть этого объема занята образующимся шлаком, оставшийся удельный объем межкусковых пространств коксовой насадки составляет следующую величину:

$$V_{\text{об}}' = V_{\text{об}} - V_{\text{шл}}'. \quad (2.63)$$

В этом случае скорректированное значение порозности коксовой насадки (с учетом нахождения в межкусковых пространствах кокса шлака) можно рассчитать по уравнению

$$\varepsilon_\text{к}^\text{б} = \frac{V_{\text{об}}^\text{б}}{V_\text{к}}. \quad (2.64)$$

После определения всех параметров шихты и газа, определяющих газодинамическое сопротивление, находится коэффициент сопротивления, являющийся настройкой модели:

$$\lambda = \frac{\Delta P_H}{\frac{W_H^2}{2} \rho_0 \frac{H_{ш}^H (1 - \varepsilon_K^B) (t_H + 273)}{d_3^K (\varepsilon_K^B)^3} \frac{1}{273} \frac{1}{\bar{P}_H}}. \quad (2.65)$$

Тогда коэффициент пропорциональности между контролируемым расходом дутья (по прибору в кубометрах в минуту) и скоростью фильтрации газа в нижней зоне доменной печи рассчитывается по уравнению

$$k_H = \frac{V_D}{W_H \bar{S}_H}, \quad (2.66)$$

где  $V_D$  — измеряемый расход дутья, м<sup>3</sup>/мин;

$\bar{S}_H$  — среднее значение поперечного сечения нижней зоны печи, м<sup>2</sup>.  
Значение коэффициента  $A$  в уравнении  $\Delta P = f(V_D)$ :

$$A_H = \lambda \frac{H_{ш}^H}{d_3^K} \frac{\rho_0^H}{2} \left[ \frac{1}{\bar{S}_H k_H} \right]^2 \left[ \frac{(1 - \varepsilon_K^B)}{(\varepsilon_K^B)^3} \right] \left( \frac{t_H + 273}{273} \right) \frac{1}{\bar{P}_H^H}. \quad (2.67)$$

В окончательном виде зависимость сопротивления слоя шихты в нижней части доменной печи с учетом параметров шихты и дутья для базового варианта доменной плавки выражается уравнением следующего вида:

$$\Delta P = A_H V_D^2. \quad (2.67a)$$

В идеологическом плане определение газодинамического сопротивления слоя шихты в верхней части доменной печи, т. е. в зоне температур ниже 1000 °С, принципиально не отличается от расчета сопротивления для нижней зоны.

В верхней зоне объем и состав меняются относительно рассчитанного ранее (в нижней зоне печи) вследствие разложения известняка (если он загружается в печь), а также в результате протекания процессов косвенного восстановления оксидов железа. Предполагается, что количество водорода в зоне темпера-

тур ниже 1000 °С не изменяется, т. е. водород как восстановитель в низкотемпературных зонах уже не работает. В этом случае объем водорода  $V_{H_2}^{зд}$  в колошниковом газе равен  $V_{H_2}^{т=1000}$ .

После определения удельного выхода колошникового газа осуществляется расчет скорости фильтрации газового потока в верхней зоне доменной печи.

При расчете газодинамических характеристик слоя шихтовых материалов определяются:

- эквивалентный диаметр куска шихты ( $d$ )

Оценка производится по эмпирическим соотношениям, описывающим зависимость эквивалентного диаметра куска шихты от гранулометрического состава материалов:

$$d = 1/\Sigma(\alpha_i/d_i), \quad (2.68)$$

где  $\alpha_i$  — содержание  $i$ -й фракции в каком-либо компоненте шихты, кг/кг;

$d_i$  — средний диаметр  $i$ -й фракции;

- порозность слоя шихтовых материалов ( $\epsilon$ )

Оценка производится по эмпирическим соотношениям, описывающим зависимость порозности слоя от гранулометрического состава материалов [17, 75, 120]:

— для кокса

$$e = 0,222 d^{0,252}, \quad (2.69)$$

— для окатышей

$$e = 0,40 - 0,29 \alpha_{(-0,5)}, \quad (2.70)$$

где  $\alpha_{(-0,5)}$  — доля мелочи, фракция 0—5 мм;

— для агломерата

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{АГЛ}} = 1 - (1 - \epsilon_K) a_K - \Sigma \{ (1 - \epsilon_i) a_i [1,582 - 2,416(d_i/d_K) + \\ + 1,485(d_i/d_K)^2 + 0,18(a_K/a_i) - 0,015(a_K/a_i)^2] \} \end{aligned} \quad (2.71)$$

где  $\epsilon_K, \epsilon_i$  — порозность самой крупной и  $i$ -й фракции, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$a_K, a_i$  — доля самой крупной и  $i$ -й фракции, кг/кг;

$d_K, d_i$  — средний диаметр самой крупной и  $i$ -й фракции, мм.

Насыпная масса загружаемой шихты ( $\gamma_n^м$ ), т/м<sup>3</sup>, определяются с учетом объемных долей компонентов шихты: кокса, агломерата, окатышей и т.д.

Высота слоя шихты в верхней зоне печи:

$$H_B = h_{\text{ш}} + h_K - h_3, \quad (2.72)$$

где  $h_{\text{ш}}$ ,  $h_K$ ,  $h_3$  — соответственно высота шахты и колошника доменной печи и уровень шихты, м.

Перепад давления газов в верхней зоне доменной печи:

$$\Delta P_B = (1 - \alpha) \cdot (P_D - P_{\text{КГ}}). \quad (2.73)$$

Коэффициент сопротивления слоя шихты в верхней зоне доменной печи:

$$\lambda_B = \frac{\Delta P_B}{\frac{W_B^2}{2} \rho_0 \frac{H_B}{d_3^3} \frac{(1 - \varepsilon_B)}{\varepsilon_B^3} \frac{(\bar{t}_B + 273)}{273} \frac{1}{\bar{P}_\Gamma^B}}. \quad (2.74)$$

В качестве примера в табл. 2.2 приводятся расчетные данные по изменению верхнего, нижнего и общего перепада давления газа по высоте слоя шихты для базового варианта в зависимости от минутного расхода дутья, подаваемого в доменную печь № 9 ОАО ММК.

Таблица 2.2

**Зависимость верхнего, нижнего и общего перепада давления газа от расхода дутья для базового варианта плавки**

Перепад давления газов, атм	Расход дутья, м³/мин							
	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
$\Delta P_H = 1,12433 \cdot 10^{-7} Q_D^2$	0,004	0,018	0,040	0,072	0,112	0,162	0,220	0,288
$\Delta P_B = 4,79417 \cdot 10^{-8} Q_D^2$	0,002	0,008	0,017	0,031	0,048	0,069	0,094	0,123
$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_H + \Delta P_B$	0,006	0,026	0,057	0,103	0,160	0,231	0,314	0,411

Перепад давления газов, атм	Расход дутья, м³/мин									
	1800	2000	2200	2400	2600	2800	2997	3000	3200	
$\Delta P_H = 1,12433 \cdot 10^{-7} Q_D^2$	0,364	0,450	0,544	0,648	0,760	0,881	1,010	1,012	1,151	
$\Delta P_B = 4,79417 \cdot 10^{-8} Q_D^2$	0,155	0,192	0,232	0,276	0,324	0,376	0,431	0,431	0,491	
$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_H + \Delta P_B$	0,519	0,642	0,776	0,924	1,084	1,257	1,441	1,443	1,642	



*Определение степени уравнивания шихты газовым потоком и расчет критических газодинамических параметров*

Степень уравнивания шихты газовым потоком находится из уравнения:

$$CU = 1000(1 - m) \frac{(P_d - P_{кг})}{H_A \cdot \gamma_H^{\text{III}}}, \quad (2.75)$$

где  $m$  — потери давления горячего дутья по тракту подачи, доли ед.;

$P_d$  — избыточное давление горячего дутья, ати;

$P_{кг}$  — избыточное давление колошникового газа, ати;

$H_A$  — «активная» высота слоя шихты в печи (высота слоя шихты от уровня воздушных фурм до уровня засыпи, м;

$\gamma_H^{\text{III}}$  — насыпная масса шихты, т/м<sup>3</sup>.

Активная высота слоя шихты — продуваемая газами часть слоя — находится из уравнения

$$H_A = h_3 + h_p + h_{\text{ш}} + h_k - h_{у3} + 0,5, \quad (2.76)$$

где  $h_3$ ,  $h_p$ ,  $h_{\text{ш}}$ ,  $h_k$ ,  $h_{у3}$  — высота заплечиков, распара, шахты, колошника, а также уровня засыпи шихты в печи, м.

Степень уравнивания, равная 55—60 %, является настройкой модели, предельной, сверх которой наблюдается переход ровного схода шихты в неровное движение материалов, с появлением в локальных участках шихты газовых полостей и участков с повышенной порозностью, что сопровождается в конечном итоге разделением слоя шихты на отдельные компоненты согласно их крупности и плотности. Критической степени уравнивания шихты газом ( $CU_{кр}$ ) соответствует определенное значение перепада давления газов по высоте слоя шихты, рассчитываемое по уравнению

$$\Delta P_{кр} = \frac{CU_{кр} H_A \gamma_H^{\text{III}}}{1000(1 - m)}. \quad (2.77)$$

Этому значению перепада давления газов соответствует критический минутный расход дутья:

$$V_{д}^{кр} = \sqrt{\frac{\Delta P_{кр}}{A_H + A_B}}. \quad (2.78)$$

На основании предложенного алгоритма расчета по определению важнейших газодинамических характеристик доменной плавки для наглядности возможно графическое отображение полученных расчетных данных.

На рис. 2.9 показана зависимость перепада давления газа по высоте слоя шихты от расхода дутья, подаваемого в доменную печь (графическое отображение данных табл. 2.1). Здесь же приведены фактические и критические параметры дутьевого режима плавки — перепады давления и соответствующие им минутные расходы дутья.

### *Решение прогнозных вариантов газодинамического режима доменной плавки*

Решенная выше задача газодинамического режима выполнена для базового варианта доменной плавки. Она позволяет найти предельную степень форсировки плавки дутьем для установленных параметров шихты и дутьевого режима.

При осуществлении технологического режима плавки часто возникает необходимость прогнозной оценки газодинамического режима при изменении состава шихты, дутьевых параметров (температуры и влажности дутья, содержания кислорода в дутье, расхода природного газа...), теплового состояния плавки. Для изменения газораспределения часто приходится менять систему загрузки печи, что неизбежно сопровождается изменением газодинамического сопротивления слоя шихты восходящему газовому потоку.

Для определения предельных параметров газодинамического режима плавки при изменившихся параметрах ниже предлагается методика расчета сопротивления слоя шихты потоку газа методом приращений — в сравнении прогнозного периода плавки с базовым, определение параметров которого было изложено выше. Для этого используется линеаризованное уравнение, полученное из выражения (2.53):

$$\begin{aligned} \frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P_B} = & \frac{\Delta H}{H_B} - \frac{\Delta d_{\text{Э}}}{d_{\text{Э}B}} + \frac{2\Delta W}{W_B^2} - \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_B} \cdot \frac{3 - 2\varepsilon_B}{1 - \varepsilon_B} + \\ & + \frac{\Delta T}{T_{\text{Э}}} - \frac{\Delta P}{P_B} + \frac{\Delta \rho}{\rho_B}, \end{aligned} \quad (2.79)$$

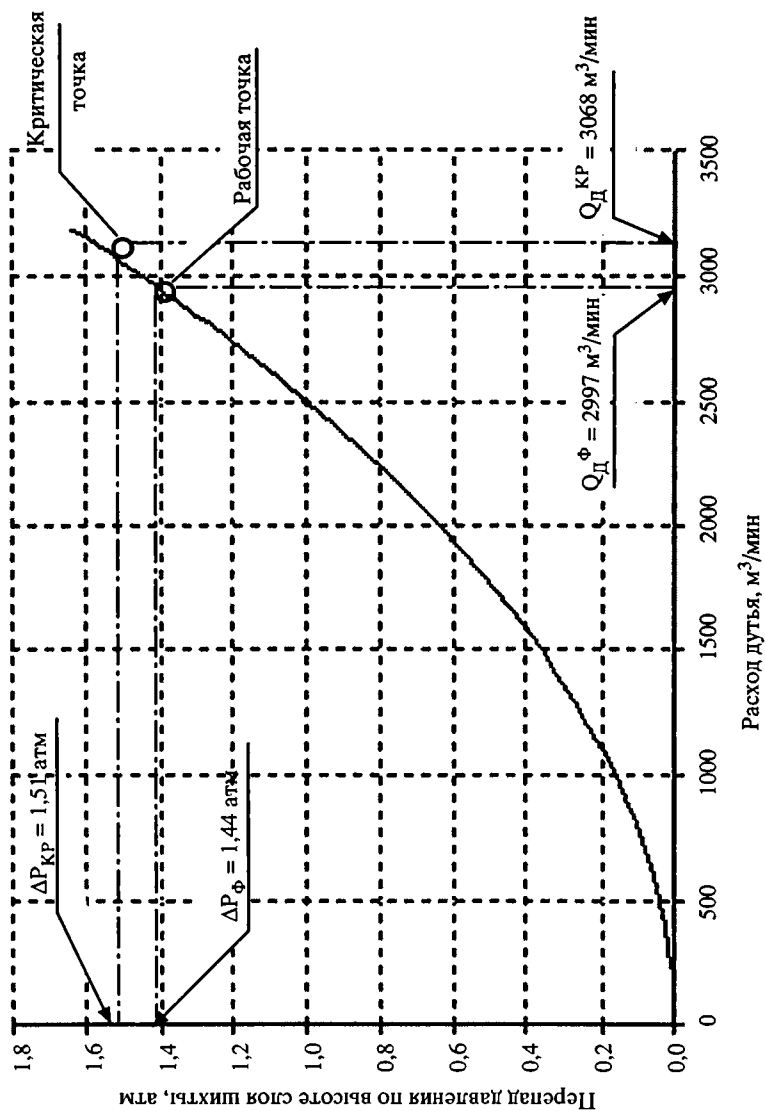


Рис. 2.9. Зависимость перепада давления газа по высоте слоя шихты от расхода дутья

где  $\Delta P_B, H_B, \dots$  — значение соответствующих параметров в базовом варианте;

$\Delta(\Delta P), \Delta H, \Delta W$  — изменение соответствующего параметра в прогнозном варианте относительно базового.

Рассмотрим в качестве примера изменение газодинамического сопротивления слоя шихты в прогнозном варианте при колебаниях гранулометрического состава шихтовых материалов.

*Влияние изменения гранулометрического состава шихтовых материалов на газодинамические характеристики столба шихты в печи*

Влияние гранулометрического состава железорудного материала и кокса оказывает сложное влияние на газодинамическое сопротивление слоя шихты в печи — гранулометрический состав изменяет значение эквивалентного диаметра куска железорудных материалов, кокса и слоя шихты в целом, а также в различной степени меняет газодинамическое сопротивление нижней и верхней зон печи.

Гранулометрический состав железорудного материала влияет в основном на газодинамику верхней зоны печи, в то время как фракционный состав кокса меняет значение эквивалентного диаметра и порозность слоя как верхней, так и нижней зон слоя шихты.

*Влияние гранулометрического состава агломерата и кокса на газодинамические характеристики верхней части слоя шихты*

Для решения поставленной задачи необходимы дополнительные данные прогнозного периода, в первую очередь удельные расходы шихтовых материалов (если они меняются в прогнозном периоде). Далее, согласно новому фракционному составу железорудных материалов и кокса, по уравнению (2.68) находят эквивалентные диаметры агломерата, окатышей и кокса в прогнозном варианте —  $d_{ЭП}^{АГЛ}$  и  $d_{ЭП}^K$ , а по уравнениям (2.69) — (2.71) определяются значения  $\epsilon_{КП}$  и  $\epsilon_{АГЛП}$ . В дальнейшем находят численные значения порозности слоя шихты  $\epsilon_{ШП}^B$  и эквивалентного диаметра  $d_{ЭП}^B$  для верхней зоны слоя в прогнозном варианте.

Используя уравнение (2.79), значение приращения сопротивления слоя шихты в верхней зоне печи относительно базового варианта плавки составит:

$$\frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P_B} = -\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_B} \cdot \left( \frac{3 - 2 \cdot \epsilon_B}{1 - \epsilon_B} \right) - \frac{\Delta d_{\Sigma}}{d_{\Sigma B}^{III}} \quad (2.80)$$

В этом случае общий перепад давления газа при движении через слой шихты при расходе дутья, равном базовому, будет следующим:

$$\Delta P_{\text{Общ}}^{\text{П}} = \Delta P_{\text{Общ}}^{\text{Н}} + \Delta P_{\text{П}}^{\text{В}}. \quad (2.81)$$

В дальнейшем определяется скорректированное значение коэффициента  $A_{\text{П}}$  в уравнении  $\Delta P = f(V_{\text{Д}})$ .

В этом случае зависимость  $\Delta P = f(V_{\text{Д}})$  для прогнозного периода запишется в виде

$$\Delta P_{\text{Общ}} = A_{\text{П}} \cdot V_{\text{Д}}^2. \quad (2.82)$$

*Влияние гранулометрического состава кокса и удельного выхода шлака на газодинамические характеристики слоя шихты в нижней зоне печи*

В том случае, когда меняется гранулометрический состав кокса, претерпевают изменение два параметра, определяющие газодинамическое сопротивление нижней зоны слоя шихты: эквивалентный диаметр кусков кокса —  $d_{\Sigma}^K$  (рассчитывается по уравнению (2.68)) и порозность слоя коксовой насадки (уравнение (2.69)). Поскольку объем межкусковых пространств кокса определяется наличием в них шлака, то при рассмотрении влияния фракционного состава кокса на газодинамическое сопротивление нижней зоны печи целесообразно рассмотреть и влияние выхода шлака на газодинамическую напряженность этой зоны.

При решении задачи прогнозной оценки изменения показателей работы печи при изменении состава подачи материалов задача газодинамики решается в следующей последовательности:

- по уравнению (2.68) находится эквивалентный диаметр кусков кокса в прогнозном варианте;

- определяется скорректированное значение порозности коксовой насадки (с учетом изменения выхода шлака);
- согласно уравнению (2.79) изменение перепада давления газа в прогнозном периоде относительно базового состояния определится из уравнения

$$\frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P_B} = -\frac{\Delta d_{\text{Э}}}{d_{\text{ЭБ}}^K} - \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_B} \frac{(3 - 2\epsilon_B)}{1 - \epsilon_B}. \quad (2.83)$$

При изменении гранулометрического состава кокса меняется порозность слоя шихты и в верхней зоне печи. В том случае, когда в прогнозном варианте предполагается изменение состава шихты, выполняются расчеты по уравнениям (2.69)—(2.71) с определением эквивалентного диаметра кусков шихты.

Аналогичным образом моделируется влияние параметров комбинированного дутья (расхода природного газа, технологического кислорода), давления колошникового газа, уровня засыпи и других входных конструктивных и режимных параметров на газодинамические параметры плавки.

### *Выбор средств разработки*

В качестве средства разработки программного обеспечения системы была выбрана среда программирования Microsoft Visual Basic 6, которая представляет собой интегрированную среду разработки (IDE, Integrated Development Environment). Visual Basic 6 содержит инструменты, которые позволяют облегчить и значительно ускорить процесс создания готового приложения, что с полным правом позволяет отнести его к средствам быстрой разработки приложений — RAD (Rapid Application Development) и ставит практически в один ряд с такими инструментами программирования, как Borland C++ Builder, Delphi и т. д.

С помощью Visual Basic 6 можно создавать приложения практически для любой области современных компьютерных технологий: бизнес-приложения, мультимедиа, базы данных. Простые приложения можно создавать, практически не прибегая к написанию программного кода, а в сложных приложениях рутинный процесс создания программного кода сведен к минимуму. Встроенные мастера Visual Basic 6 дают возможность быстро создавать прототипы приложений, готовых для обсуждения и согласования с заказчиком.

В Visual Basic 6 используются все самые современные методы программирования: модель составных объектов COM (Component Object Model), распределенная модель составных объектов DCOM (Distributed Component Object Model), технология программных компонентов ActiveX и другие.

### *Разработка алгоритмического обеспечения системы*

Общий алгоритм работы программы представлен на рис. 2.10.

Пакет программ выполняет следующие функции:

- расчет верхнего, нижнего и общего перепадов давления:
  - степени уравнивания шихты;
  - расхода дутья;
  - скоростей фильтрации газа (в области горна, распара и колошника);
- визуальное отображение результатов расчетов в виде графиков;
- расчет величин в проектный период при изменении входных параметров:
  - уровня засыпи;
  - гранулометрического состава и порозности слоя агломерата;
  - гранулометрического состава и порозности слоя кокса;
  - параметров комбинированного дутья;
  - давления колошниковога газа;
  - удельного выхода шлага.

### *Условия выполнения программы*

Для выполнения программы требуется наличие операционной системы Microsoft Windows 98/ME/NT/2000/XP.

### *Выполнение программы*

После запуска программы на экране появляется главное меню программы, основные пункты которого предоставляют следующие возможности:

- *Файл* — загрузка и сохранение вариантов исходных данных для различных режимов работы доменной печи;
- *Данные* — возможность изменять исходные данные для выбранного варианта расчета;

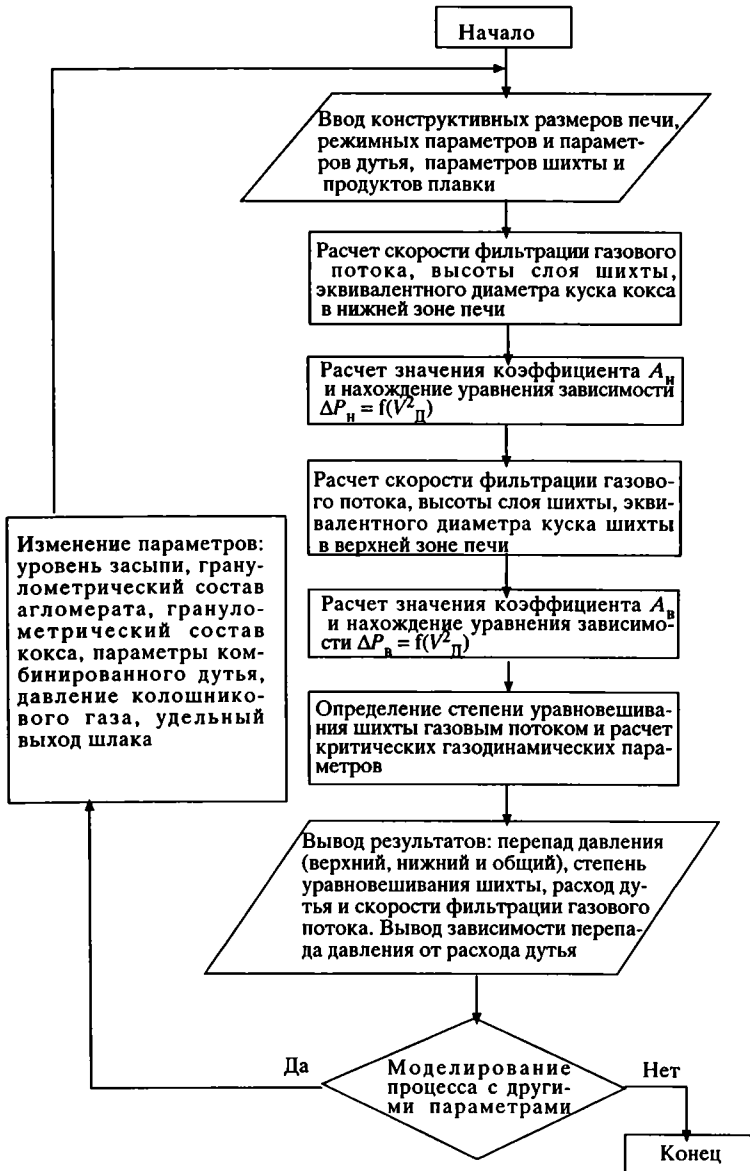


Рис. 2.10. Блок-схема программы



- *Расчет* — вызывает процедуру расчета для базового и прогнозного вариантов;
- *Результаты* — отображение результатов расчета в табличном или графическом виде;
- *Справка* — вызов справочной информации по работе с программой.

### Исходные данные для расчета

Все исходные данные для расчета, а также их начальные значения для одного из вариантов расчета сгруппированы по категориям и представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Исходные данные для расчета

Категория	Параметр
1	2
<i>Доменная печь</i>	
Геометрические параметры доменной печи	Высота заплечиков, м Высота распара, м Высота шахты, м Высота колошника, м Диаметр горна доменной печи, м Диаметр распара доменной печи, м Диаметр колошника доменной печи, м
Режимные параметры работы доменной печи	Уровень засыпи, м Суточная производительность доменной печи, т/сут Доля нижнего перепада давления от общего, доли ед. Избыточное давление горячего дутья, ати Потери давления по тракту горячего дутья, доли ед. Избыточное давление колошниково-го газа, ати Степень прямого восстановления

Продолжение таблицы 2.3

1	2
<b>Параметры шихты</b>	
Агломерат	<p>Содержание фракции агломерата &gt;50 мм в материале шихты, %</p> <p>Содержание фракции агломерата 25—50 мм в материале шихты, %</p> <p>Содержание фракции агломерата 10—25 мм в материале шихты, %</p> <p>Содержание фракции агломерата 5—10 мм в материале шихты, %</p> <p>Содержание фракции агломерата &lt;5 мм в материале шихты, %</p> <p>Средний размер фракции агломерата &gt;50 мм в материале шихты, мм</p> <p>Средний размер фракции агломерата 25—50 мм в материале шихты, мм</p> <p>Средний размер фракции агломерата 10—25 мм в материале шихты, мм</p> <p>Средний размер фракции агломерата 5—10 мм в материале шихты, мм</p> <p>Средний размер фракции агломерата &lt;5 мм в материале шихты, мм</p> <p>Порозность фракции агломерата &gt; 50 мм, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup></p> <p>Порозность фракции агломерата 50—25 мм, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup></p> <p>Порозность фракции агломерата 25—10 мм, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup></p> <p>Порозность фракции агломерата 10—5 мм, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup></p> <p>Порозность фракции агломерата &lt;5 мм, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup></p> <p>Насыпная масса слоя агломерата, т/м<sup>3</sup></p>
Окатыши	<p>Содержание мелких фракций (&lt;0,5 мм) в окатышах, доли ед.</p> <p>Насыпная масса слоя окатышей, т/м<sup>3</sup></p> <p>Доля окатышей в ЖРМ, доли ед.</p>
ЖРМ	Удельный расход ЖРМ, т/т чугуна
Известняк	Удельный расход известняка, кг/т чугуна

Продолжение таблицы 2.3

1	2
	Потери массы при прокаливании известняка, мас. %
<b>Кокс</b>	
Кокс	Удельный расход кокса, кг/т чугуна Содержание фракции кокса >80 мм в материале шихты, % Содержание фракции кокса 80—60 мм в материале шихты, % Содержание фракции кокса 60—40 мм в материале шихты, % Содержание фракции кокса 40—25 мм в материале шихты, % Содержание фракции кокса <25 мм в материале шихты, % Средний размер фракции кокса >80 мм в материале шихты, мм Средний размер фракции кокса 80—60 мм в материале шихты, мм Средний размер фракции кокса 60—40 мм в материале шихты, мм Средний размер фракции кокса 40—25 мм в материале шихты, мм Средний размер фракции кокса <25 мм в материале шихты, мм Насыпная масса кокса, кг/м <sup>3</sup> Содержание «нелетучего» углерода в коксе, мас. %
<b>Параметры дутья</b>	
	Содержание O <sub>2</sub> в дутье, % Влажность дутья, г/м <sup>3</sup> Удельный расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна Температура горячего дутья, °C Минутный расход дутья, м <sup>3</sup> /мин
<b>Продукты плавки</b>	
Чугун	Содержание железа в чугуне, мас. % Содержание марганца в чугуне, мас. % Содержание фосфора в чугуне, мас. % Содержание кремния в чугуне, мас. %

1	2
Шлак	Содержание углерода в чугуне, мас. %
	Содержание серы в шлаке, мас. %
	Удельный выход шлака, кг/т чугуна
	Плотность шлака, кг/м <sup>3</sup>
	Коэффициент, учитывающий подвижность шлака
Колошниковый газ	Коэффициент, учитывающий степень гетерогенности шлака
	Содержание CO <sub>2</sub> в колошниковом газе, об. %
	Содержание CO в колошниковом газе, об. %
	Температура колошникового газа, °C

После загрузки одного из вариантов исходных данных пользователь может скорректировать любые параметры с помощью диалогового окна, вид которого представлен на рис. 2.11.

Корректировка величины параметра осуществляется нажатием кнопки «Изменить...» или двойным щелчком мыши. Для каждого параметра предусмотрены всплывающие подсказки, которые появляются на экране при наведении на соответствующий параметр указателя мыши.

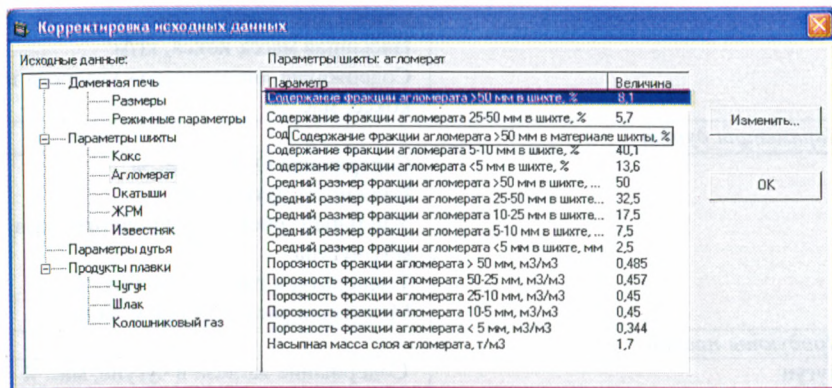


Рис. 2.11. Окно корректировки исходных данных: параметры шихты, агломерат

### Результаты расчета для базового режима

Для базового режима в программе предусмотрен расчет показателей, представленных в диалоговом окне на рис. 2.12.

Графическое представление с указанием рабочей точки отражено на рис. 2.13. В окне показано графическое положение рабочей и критической точек. Рабочая точка соответствует текущим параметрам работы доменной печи, которые пользователь ввел как исходные данные. Положение критической точки определяется параметрами работы доменной печи, рассчитанными исходя из предельной степени уравнивания шихты 55 %. После графика отражены также количественные характеристики

Результаты расчета для базового режима

График Таблица

<b>Перепад давления, атм.:</b>		<b>Скорость фильтрации газа в области горна, м/с:</b>	
- верхний	1,432	- при нормальных условиях	1,57
- нижний	1,008	- действительная	7,46
- общий	1,44	<b>Скорость фильтрации газа в области распара, м/с:</b>	
<b>Степень уравнивания шихты, %</b>		- при нормальных условиях	1,24
	53,79	- действительная	6,02
<b>Расход дутья, м<sup>3</sup>/мин.:</b>		<b>Скорость фильтрации газа через колошник, м/с:</b>	
- по показаниям КИП	2997	- при нормальных условиях	2,48
- критический	3030,6	- действительная	5,82

Расход дутья, м <sup>3</sup> /мин.	0	299,7	599,4	899,1	1198,8	1498,5	1798,2	2097,9	2397,6	2697,3	2997	3296,7
Перепад давления, атм.	0	,014	,058	,13	,23	,36	,518	,706	,922	1,166	1,44	1,742

Температура горения, °C: 1985

Газодинамические параметры

<b>Рабочая точка:</b>		<b>Критическая точка:</b>	
Перепад давления, атм.:	1,44	Перепад давления, атм.:	1,472
Расход дутья, м <sup>3</sup> /мин.:	2997	Расход дутья, м <sup>3</sup> /мин.:	3030,6

OK

Рис. 2.12. Отображение параметров газодинамического режима для базового варианта расчета



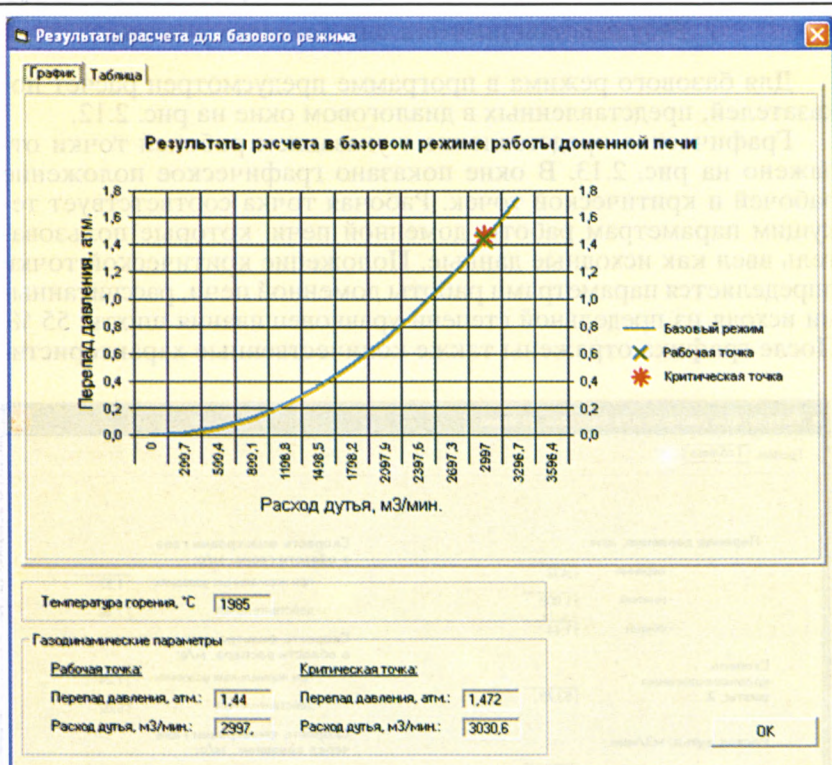


Рис. 2.13. Графическое отображение параметров газодинамического режима для базового варианта расчета

ки рабочей и критической точек, в частности перепад давления и минутный расход дутья.

### Настройка прогнозного режима

На рис. 2.14 отражено диалоговое окно программы с возможностью выбора тех параметров работы доменной печи, влияние которых на газодинамический режим ее работы можно рассчитать в программе.

Оценка влияния агломерата и кокса на газодинамику производится через изменение их гранулометрического состава, в частности эквивалентного диаметра куска и порозности слоя. С

**Влияние параметров на газодинамику доменной печи**

**Засыпь**  
☐ Уровень засыпи, м  
 База: 1.7 Прогноз:

**Агломерат**  
☐ Гранулометрический состав Изменить  
 Эквивалентный диаметр куска, мм  
 База: 7.7 Прогноз:   
 Порозность слоя, м3/м3  
 База: 301 Прогноз:

**Кокс**  
☐ Гранулометрический состав Установить  
 Эквивалентный диаметр куска, мм  
 База: 54.7 Прогноз:   
 Порозность слоя, м3/м3  
 База: 46 Прогноз:

**Дутьевые параметры**  
☒ Параметры комбинированного дутья  
 Расход природного газа, м3/т чугуна  
 База: 105 Прогноз: 105  
 Содержание кислорода в дутье, %  
 База: 24 Прогноз: 25  
 Температура дутья, °C  
 База: 1140 Прогноз: 1140  
 Влажность дутья, г/м3  
 База: 6.36 Прогноз: 6.36

**Колошниковый газ**  
☐ Давление, атм  
 База: 1.25 Прогноз:

**Шлак**  
☐ Удельный расход, кг/т чугуна  
 База: 250 Прогноз:

OK

Рис. 2.14. Окно настройки параметров для прогноза

этой целью пользователю предоставлена возможность корректировки гранулометрического состава агломерата и кокса через изменение процентного состава различных фракций. Пример для агломерата показан на рис. 2.15.

### Результаты расчета для прогнозного режима

После настройки параметров, влияние которых на газодинамику пользователь желает оценить (см. рис. 2.14), запускается команда расчета. Результаты выводятся в отдельной форме в табличном и графическом видах. Пример расчета влияния увеличения содержания кислорода в дутье с 24 % в базовом режиме до 25 % в прогнозном варианте показан на рис. 2.16 и рис. 2.17.

Для завершения работы программы необходимо выбрать пункт меню *Файл* ► *Выход*.



**Корректировка гранулометрического состава агломерата**

Размер фракции, мм	> 50	50 - 25	25 - 10	10 - 5	< 5	
Содержание фракции, %	База	8,1	5,7	32,5	40,1	13,6
	Прогноз	8,1	5,7	32,5	40,1	13,6

Невязка по содержанию фракции, %: 0,00

OK

Рис. 2.15. Окно для изменения гранулометрического состава агломерата

**Результаты расчета для прогнозного режима**

График: Таблица

	ВЕРХНИЙ перепад давления, атм.	НИЖНИЙ перепад давления, атм.	ОБЩИЙ перепад давления, атм.	Расход дутья, м <sup>3</sup> /мин.	Приrost производительности, %
<b>Базовое значение</b>	,432	1,008	1,44	2997,	
<b>Влияние параметров:</b>					
- уровень газыли					
- гранулометрия агломерата					
- гранулометрия кокша					
- дутьевые параметры	,422	,978	1,4	3039,5	1,42
- давление колошачьего газа					
- удельный расход кокша					
<b>Итоговое значение</b>	,422	,978	1,4	3039,5	1,42

Газодинамические параметры

Рабочая точка

Перепад давления, атм.: 1,44

Расход дутья, м<sup>3</sup>/мин.: 2997

Температура горения, °C

Базовый режим: 1965

Прогнозный режим: 2010

OK

Рис. 2.16. Результаты расчета влияния изменения содержания кислорода в дутье на газодинамические параметры работы доменной печи



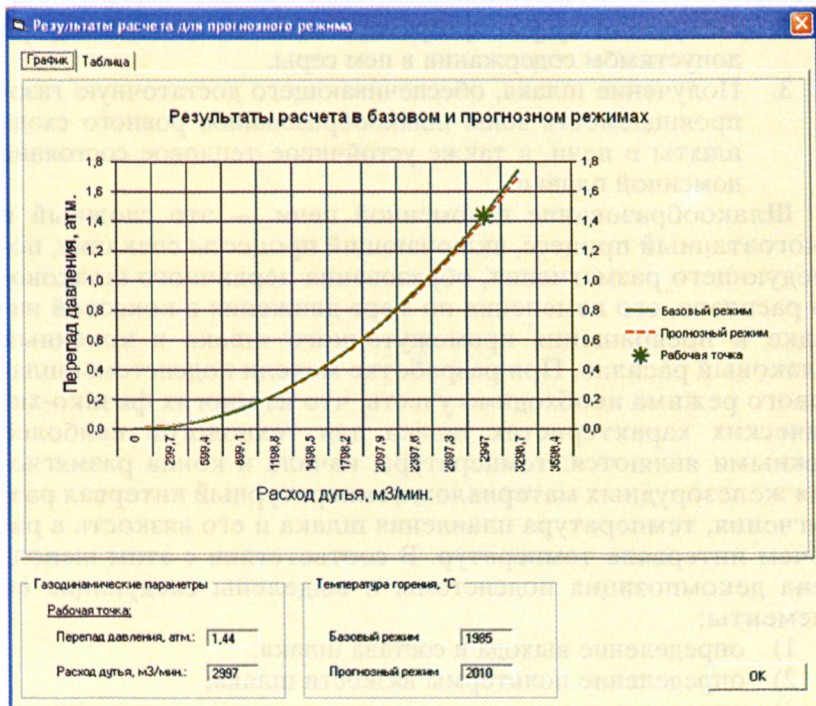


Рис. 2.17. Графическое представление результатов расчета влияния изменения содержания кислорода в дутье на газодинамические параметры работы доменной печи

## 2.4. Подсистема шлакового режима ( $S_3$ )

Шлаковый режим доменной плавки в существенной степени определяет конечные результаты работы доменной печи — удельный расход кокса и производительность. Состав шлака, его количество и свойства оказывают воздействие на газодинамические, тепловые и восстановительные процессы, протекающие в печи.

Моделирование шлакового режима выполняется в целях решения следующих технологических задач:

1. Получение шлака, обладающего надлежащими свойствами в ходе всего процесса шлакообразования, начиная со стадии размягчения, последующей фильтрации первичного шлакового расплава в коксовой насадке и заканчивая получением конечного шлакового расплава.

2. Получение чугуна требуемого химического состава при допустимом содержании в нем серы.
3. Получение шлака, обеспечивающего достаточную газопроницаемость зоны шлакообразования, ровного схода шихты в печи, а также устойчивое тепловое состояние доменной плавки.

Шлакообразование в доменной печи — это сложный и многоэтапный процесс, включающий процессы спекания, последующего размягчения, образования первичного шлакового расплава, его изменения по мере движения в коксовой насадке и превращения промежуточного шлака в конечный шлаковый расплав. При разработке модели подсистемы шлакового режима необходимо учесть, что из многих физико-химических характеристик шлака для технологов наиболее важными являются: температуры начала и конца размягчения железорудных материалов, температурный интервал размягчения, температура плавления шлака и его вязкость в рабочем интервале температур. В соответствии с этим выполнена декомпозиция подсистемы и выделены следующие ее элементы:

- 1) определение выхода и состава шлака;
- 2) определение политермы вязкости шлака;
- 3) определение температур начала и конца размягчения ЖРМ, высоты зоны вязкопластичного состояния;
- 4) определение десульфурирующей способности шлака и содержания серы в чугуне;
- 5) диагностика шлакового режима.

Структура модели шлакового режима приведена на рис. 2.18, где отражены связи этой подсистемы с другими подсистемами.

В целях снижения погрешностей при моделировании шлакового режима используется натурно-модельный подход.

### *Определение выхода и состава шлака*

В основе расчета выхода и состава шлака (содержание в шлаке  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ) лежат уравнения материальных балансов основных химических элементов и их соединений. Так, например, выход шлака можно рассчитать по балансу шлакообразующих (см. уравнение (2.21)), балансу оксида кальция (см. уравнение (2.23)).

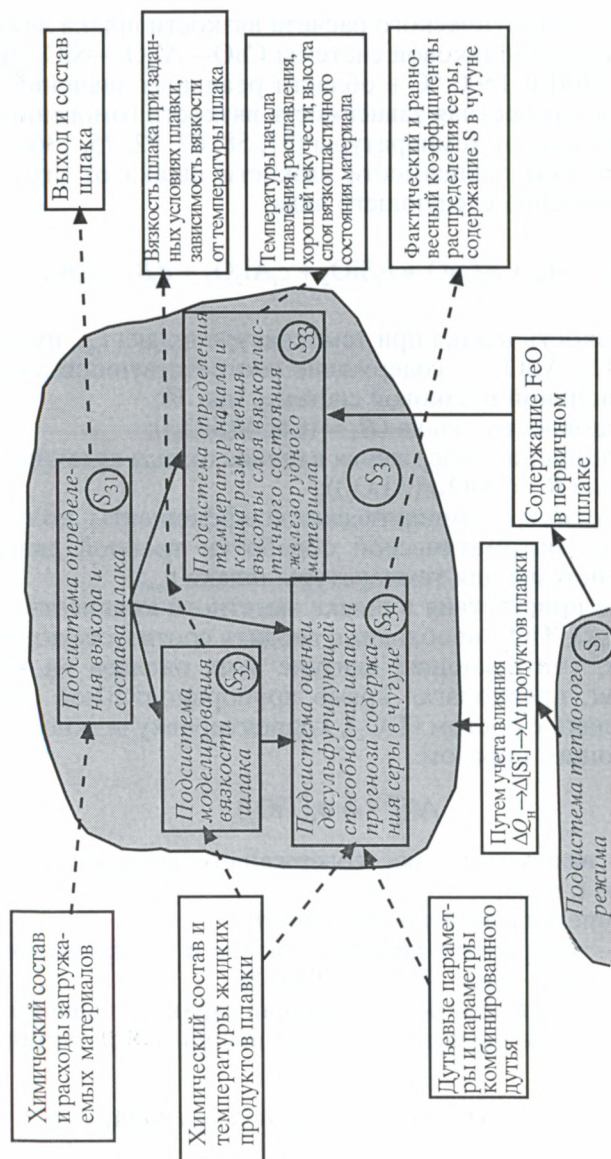


Рис. 2.18. Структура подсистемы шлакового режима

### Определение вязкости шлака

В основе аналитического расчета вязкости шлака лежат диаграммы тройной шлаковой системы  $\text{CaO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$  при температурах 1400 и 1500 °С в области реальных значений доменных шлаков и известная зависимость вязкости гомогенных шлаковых расплавов от температуры [57, 58, 67, 72, 75, 136—139].

Для описания зависимости вязкости шлака от его состава принято уравнение следующего вида:

$$\eta_t = a_0 + a_1\text{CaO} + b_1\text{SiO}_2 + c_1\text{Al}_2\text{O}_3 + d_1B_1 + e_1B_2, \quad (2.84)$$

где  $\eta_t$  — вязкость шлака при температуре шлака  $t_{\text{шл}}$ , пуаз;

$\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — содержание соответствующих оксидов в трехкомпонентной шлаковой системе, мас. %;

$B_1$  — основность шлака ( $B_1 = (\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$ );

$B_2$  — отношение содержания в шлаке оксида кремния к оксиду алюминия ( $B_2 = (\text{SiO}_2)/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ );

$a_0, a_1, b_1, c_1, d_1, e_1$  — эмпирические коэффициенты, полученные в результате математической обработки тройной диаграммы шлаковой системы для температуры шлака  $t_{\text{шл}}$ .

В случае присутствия в шлаке заметного количества других оксидов ( $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ) необходимо вводить соответствующие корректировки, учитывающие влияние этих оксидов на вязкость шлаков. Так, предполагая прямо пропорциональное снижение вязкости шлака с ростом ( $\text{TiO}_2$ ), корректировку можно осуществить следующим образом:

$$\Delta\eta_t^{\text{TiO}_2} = \alpha_t(\text{TiO}_2), \quad (2.85)$$

где  $\eta_t^{\text{TiO}_2}$  — вязкость шлака, содержащего диоксид титана при температуре  $t$ , пуаз;

$\alpha_t$  — температурный коэффициент;

$(\text{TiO}_2)$  — содержание диоксида титана в четырехкомпонентной системе  $\text{CaO—SiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2$ , %.

Оксид магния имеет более сложный характер влияния на вязкость шлака. Для расчета поправки используется полином 3-й степени:

$$\Delta\eta_t^{\text{MgO}} = \alpha_{t3}(\text{MgO})^3 + \alpha_{t2}(\text{MgO})^2 + \alpha_{t1}(\text{MgO}) + \alpha_{t0}, \quad (2.86)$$

где  $(\text{MgO})$  — содержание оксида магния в шлаке, %;

$\alpha_3, \alpha_2, \alpha_1, \alpha_0$  — эмпирические коэффициенты, полученные в результате математической обработки диаграмм шлаковых систем для температуры шлака  $t_{\text{шл}}$ .

Для технологов, ведущих доменную плавку, необходимо знать не только численные значения вязкости при фиксированных температурах, например 1400 и 1500 °С, но и характер зависимости вязкости от температуры в диапазоне 1350—1550 °С.

Известно, что для гомогенных шлаковых расплавов влияние температуры на вязкость шлака описывается уравнением Лешателье, имеющим следующую структуру:

$$\ln(\ln(\eta)) = a_0 + a_1 t_{\text{шл}}, \quad (2.87)$$

где  $a_0$  и  $a_1$  — коэффициенты априорно неизвестные.

При известных значениях вязкости шлака конкретного состава при температурах 1400 и 1500 °С ((2.84)—(2.86)), решая систему уравнений вида (2.87), можно получить численные значения коэффициентов  $a_0, a_1$  и, тем самым конкретизируя уравнение (2.87), найти функциональную зависимость вязкости шлака от его температуры.

Параметрами полученной политермы вязкости являются:

- температура плавления шлака;
- вязкость шлака на выпуске;
- градиент вязкости шлака.

Известно, что расплав из коксовой насадки начинает вытекать, когда его вязкость достигает 2,5 Па·с [12, 75]. В связи с этим за условную температуру плавления шлака ( $t_{\text{пл}}$ ) принята температура, при которой шлак имеет вязкость 25 пуаз (2,5 Па·с),  $t_{\text{шл}}^{25}$ .

$$t_{\text{шл}}^{25} = t_{\text{пл}} = \frac{-a_0 + \lg \lg 25}{a_1}. \quad (2.88)$$

Вязкость шлака на выпуске зависит от конечной температуры шлака ( $t_{\text{шл}}$ ), связанной с температурой чугуна ( $t_{\text{чуг}}$ ) и его химическим нагревом и рассчитывается по уравнению следующего вида:

$$t_{\text{шл}} = t_{\text{чуг}} + c_0[\text{Si}] + c_1[\text{Si}]^2, \quad (2.89)$$

где  $c_0$  и  $c_1$  — эмпирические коэффициенты.

По уравнению (2.87) рассчитывается вязкость шлака при  $t_{\text{шл}}$  ( $\eta_{\text{шл}}$ ); определяется температура шлака, соответствующая пре-

дельно допустимой вязкости шлака для нормального хода плавки, по умолчанию принятой в модели равной 7 пуаз,  $t_{\text{шл}}^{(7)}$ .

Одной из важнейших характеристик шлакового режима является устойчивость шлаковых систем («короткие» и «длинные» шлаки). Изменения процессов шлакообразования вызывают колебания основности шлака, которые в свою очередь приводят к изменению температурного интервала вязкопластичного состояния. Для оценки устойчивости шлака используется градиент вязкости шлака, численно равный уменьшению вязкости шлака при увеличении температуры шлака на 1 °С в диапазоне вязкости шлака от 25 до 7 пуаз:

$$\Delta\eta_7^{25} / \Delta t = \frac{25 - 7}{t_{\text{шл}}^7 - t_{\text{шл}}^{25}}, \quad \text{пуаз/}^\circ\text{С}. \quad (2.90)$$

Градиент вязкости шлака наряду с допустимыми при различных температурах шлака диапазонами вязкости шлака используется при моделировании шлакового режима в качестве ограничивающего фактора для диагностики шлакового режима. При этом выбор предельных значений каждого из диапазонов и градиента вязкости осуществляется методом экспертного оценивания:

$$\eta_{\text{шл}}^{\min} \leq \eta_{\text{шл}} \leq \eta_{\text{шл}}^{\max}, \quad \left( \Delta\eta_7^{25} / \Delta t \right) \leq \left( \Delta\eta_7^{25} / \Delta t_{\max} \right). \quad (2.91)$$

Так, для условий доменных печей ОАО ММК приняты следующие ограничения:

- 1) если вязкость шлака при температуре 1450 °С находится в пределах 5,5—7,0 пуаз, то шлак характеризуется повышенной вязкостью в области рабочих температур;
- 2) если вязкость шлака при температуре 1450 °С превышает 7,0 пуаз, то вязкость шлака в области рабочих температур превышает допустимые пределы для нормального режима плавки;
- 3) если вязкость шлака при температуре 1450 °С меньше 2 пуаз, то шлак характеризуется малой вязкостью, обладает высокой агрессивностью к огнеупорной кладке и разрушает гарнисаж;

4) если градиент вязкости  $\Delta\eta_7^{25}/\Delta t \geq 0,35$ , то шлак относится к типу «коротких». Возможно загромождение горна, образование настывей, застывание шлака в желобах. Режим работы печи затруднен.

*Определение температурного интервала плавления и высоты зоны вязкопластичного состояния*

Свойства шлака в ходе всего процесса шлакообразования, начиная со стадии размягчения, последующей фильтрации первичного шлакового расплава в коксовой насадке и заканчивая получением конечного шлакового расплава, определяются его составом. От состава железорудных материалов зависят характерные температуры:

- температура начала размягчения, соответствует началу усадки — температуре образования первых порций жидких фаз;
- температура расплавления, соответствует температуре появления подвижного шлакового расплава.

Для определения этих температур необходимо знать соответствующие температуры для всех железорудных компонентов доменной шихты. Температура начала размягчения и температура расплавления железорудного материала могут быть рассчитаны по эмпирическим уравнениям, структура которых имеет одинаковый вид:

$$T = a_0 + a_1(\text{CaO/SiO}_2) + a_2\text{MgO} - a_3\text{Al}_2\text{O}_3 - a_4\text{FeO} - a_5\text{MnO}, \quad (2.92)$$

где CaO, SiO<sub>2</sub>, ... — содержание соответствующих оксидов в железорудном материале, %;

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  — эмпирические коэффициенты, различные для температуры начала размягчения и температуры плавления.

Тогда температурный интервал плавления ( $\Delta t_{\text{пл}}$ ) железорудных материалов рассчитывается по уравнению

$$\Delta t_{\text{пл}} = T_{\text{р}}^{\text{max}} - T_{\text{н.пл}}^{\text{min}}, \quad (2.93)$$

где  $T_{\text{р}}^{\text{max}}$  — максимальное значение температуры расплавления из всех применяемых железорудных материалов, °C;

$T_{н.пл}^{\min}$  — минимальное значение температуры образования первых порций шлака из применяемых для плавки железорудных материалов, °С.

Введя допущение, что газодинамическую напряженность зоны вязко-пластичных шлаковых масс создает слой железорудных материалов, начиная с момента 50 %-ной усадки слоя до момента появления подвижного шлакового расплава ( $T_p$ ) скорректированное значение температурного интервала ( $\Delta t_{пл}^*$ ) можно рассчитать по уравнению

$$\Delta t_{пл}^* = 0,5 \Delta t_{пл}. \quad (2.94)$$

Изменение температуры материала на 1 м высоты слоя в нижней ступени теплообмена в среднем представим по уравнению

$$\Delta t_{н.ст} = \{[(t_{чуг} c_{чуг} + U t_{шл} c_{шл}) / (c_{чуг} + U c_{шл}) - t_0] / H_{н.ст}\}, \quad (2.95)$$

где  $t_0$  — температура зоны замедленного теплообмена, °С;

$H_{н.ст}$  — высота нижней ступени теплообмена, м;

$c_{чуг}$ ,  $c_{шл}$  — теплоемкости чугуна и шлака, кДж/(кг·град).

Данные допущения позволяют оценить высоту слоя вязко-пластического состояния материалов, которая определяется по соотношению

$$h_{в.м} = \Delta t_{пл}^* / \Delta t_{н.ст} \quad (2.96)$$

### *Оценка десульфуризирующей способности шлака и прогнозного содержания серы в чугуне*

Анализ имеющихся в литературе данных по расчетному определению содержания серы в чугуне показывает что, во-первых, практически все расчетные уравнения носят эмпирический характер, во-вторых, все они выведены для условий ведения плавки в определенных условиях и не могут полностью быть применимы для достоверного определения содержания серы в чугуне в иных условиях доменной плавки. Более достоверные результаты, как показывает опыт использования пакета, можно получить, если использовать принцип натурно-модельного подхода и метод приращений [140—141].



В основе расчета изменения содержания серы в чугуне лежит баланс серы, который может быть представлен следующим простым соотношением [12, 17]:

$$M_s(1 - \lambda) = [S] + U(S), \quad (2.97)$$

где  $M_s$  — масса серы, поступившая в печь, т/т чугуна;

$\lambda$  — степень улетучивания серы, доли ед.;

$[S]$  — содержание серы в чугуне, кг/кг;

$(S)$  — содержание серы в шлаке, кг/кг.

В практике доменной плавки принято оценивать распределение серы между чугуном и шлаком с помощью коэффициента распределения серы ( $L_s$ ), который определяется как отношение содержания серы в шлаке к содержанию серы в чугуне:

$$L_s = (S)/[S]. \quad (2.98)$$

Если выражение (2.98) подставить в баланс серы (2.97) и разрешить его относительно содержания серы в чугуне  $[S]$ , то получим следующее выражение:

$$[S] = \frac{M_s(1 - \lambda)}{1 + L_s U}. \quad (2.99)$$

Для расчета изменения содержания серы в чугуне  $\Delta[S]$  при изменении параметров загружаемой шихты и свойств шлака целесообразно использовать уравнение, полученное в результате линеаризации соотношения (2.99) при постоянной степени улетучивания серы  $\lambda$ .

$$\frac{\Delta[S]}{[S]} = \frac{\Delta M_s}{M_s^6} - \frac{U^6}{1 + L_s^6 U^6} \Delta L_s - \frac{L_s^6}{1 + L_s^6 U^6} \Delta U, \quad (2.100)$$

где знак  $\Delta$ , стоящий перед любым параметром, означает изменение этого параметра в прогнозном периоде по отношению к базовому, например

$$\Delta L_s = L_s - L_s^6.$$

В данном уравнении наибольшую сложность вызывает расчет коэффициента распределения серы  $L_s$  для прогнозного периода.

Коэффициент распределения серы между чугуном и шлаком  $L_S$  определяется многими факторами, в частности температурой шлака, активностью  $\text{CaO}$  в шлаке, вязкостью шлака, парциальным давлением  $\text{CO}$  в области прямого восстановления железа и др.

Авторами для оценки  $L_S$  предложено уравнение, имеющее структуру, отражающую влияние основных параметров процесса на десульфурирующую способность шлака:

$$\lg L_S = a_0 \lg b + a_1 t_{\text{шл}} - a_2 \lg \eta + a_3 \lg \left( \frac{f_{[S]}}{P_{\text{CO}}} \right) + a_4 U, \quad (2.101)$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  — постоянные коэффициенты, определяемые методом параметрической идентификации по информации о работе печи в базовый период;

$b$  — обобщенная основность шлака (по И.С. Куликову) [121]

$$b = \frac{(\text{CaO}) + \alpha(\text{MgO})}{(\text{SiO}_2) + 0,6(\text{Al}_2\text{O}_3) \left[ \frac{(\text{CaO}) + \alpha(\text{MgO})}{(\text{SiO}_2)} - 1,19 \right]}, \quad (2.102)$$

$$\text{здесь } \alpha = \frac{1,84(\text{SiO}_2) - 0,9(\text{CaO})}{(\text{SiO}_2) + 0,9(\text{MgO})};$$

$f_{[S]}$  — коэффициент активности серы в чугуне;

$$\lg f_{[S]} = 0,11[\text{C}]_3 + 0,006[\text{C}]_3^2,$$

здесь  $[\text{C}]_3$  — эквивалентное содержание углерода в чугуне, определяется составом чугуна:

$$[\text{C}]_3 = [\text{C}] + 0,63 \cdot [\text{Si}] + 0,40 [\text{P}].$$

$P_{\text{CO}}$  — парциальное давление монооксида углерода в горновом газе, учитывающее восстановительный потенциал в зоне десульфурации и оказывающее влияние на процесс удаления серы из металла в шлак:

$$P_{\text{CO}} = (P_{\text{д}} + 1) \cdot \gamma_{\text{CO}},$$

здесь  $P_d$  — избыточное давление горячего дутья, ати;

$\gamma_{CO}$  — доля CO в горновом газе, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Тогда логарифм отношения расчетного значения коэффициента распределения серы в прогнозном  $L_s$  и базовом  $L_s^6$  периодах можно рассчитать по уравнению

$$\lg\left(\frac{L_s}{L_s^6}\right) = A; \quad (2.103)$$

$$L_s = L_s^6 10^A,$$

где

$$A = a_0 \lg(b/b_6) + a_1(t_{шл} - t_{шл}^6) - a_2 \lg(\eta/\eta^6) + \\ + a_3 \lg\left(\frac{f_{[S]}/f_{[S]}^6}{P_{CO}/P_{CO}^6}\right) + a_4(U - U_6). \quad (2.104)$$

В этих выражениях  $L_s^6$  — известный коэффициент распределения серы, определяемый по содержанию серы в чугуне и шлаке в базовом периоде; параметры: обобщенная основность шлака  $b$ , температура шлака  $t_{шл}$ , вязкость шлака  $\eta$ , коэффициент активности серы в чугуне  $f_{[S]}$ , парциальное давление монооксида углерода в горновом газе  $P_{CO}$  рассчитываются по текущей информации для условий как базового периода (индекс 6), так и проектного периода (без индекса).

В соответствии с поставленными при разработке модели целями, ее реализация позволяет решать следующие технологические задачи:

- 1) расчет требуемого расхода одного из флюсующих материалов при изменении сырьевых условий и параметров процесса;
- 2) расчет требуемого соотношения компонентов железорудной части шихты при изменении сырьевых условий и параметров процесса;
- 3) оценка свойств шлака при заданных расходах и составах железорудных компонентов и флюсующих материалов.

Для выполнения расчетов по установлению шлакового режима технолог должен иметь информацию о составе проплавляемого сырья и параметрах плавки, а в результате выполненных расчетов получить данные о составе продуктов плавки, свойст-

вах шлака — его вязкости, температуре плавления, серопоглотительной способности, пригодности шлака для реализации нормального хода плавки.

Алгоритм, реализующий математическую модель подсистемы шлакового режима, представлен блок-схемой на рис. 2.19 и состоит в следующем:

1. Вводятся необходимые для расчетов исходные данные о параметрах и показателях работы печи в базовый период:

1) сырьевые условия — расходы и химические составы:

- железорудной части шихты;
- флюсов;
- кокса;

2) дутьевые параметры:

- расход;
- давление;
- температура;
- влажность;
- содержание кислорода;
- расход природного газа;

3) состав продуктов плавки:

- чугуна;
- шлака;
- колошникового газа.

2. Рассчитываются параметры шлакового режима в базовый период:

1) состав шлака (по составу шлакообразующих элементов используемой шихты);

2) выход и температура шлака;

3) политерма вязкости шлака и ее параметры — температура плавления шлака, вязкость шлака на выпуске, градиент вязкости шлака;

4) температура плавления и температурный интервал плавления железорудных материалов и высота зоны вязкопластичного состояния;

5) коэффициент распределения серы между шлаком и чугуном по фактическому содержанию серы в шлаке и чугуне.

3. В режиме диалога пользователем задаются для рассчитываемого (проектного) периода:

1) состав шихты:

- соотношение и химические составы компонентов железорудной части шихты;

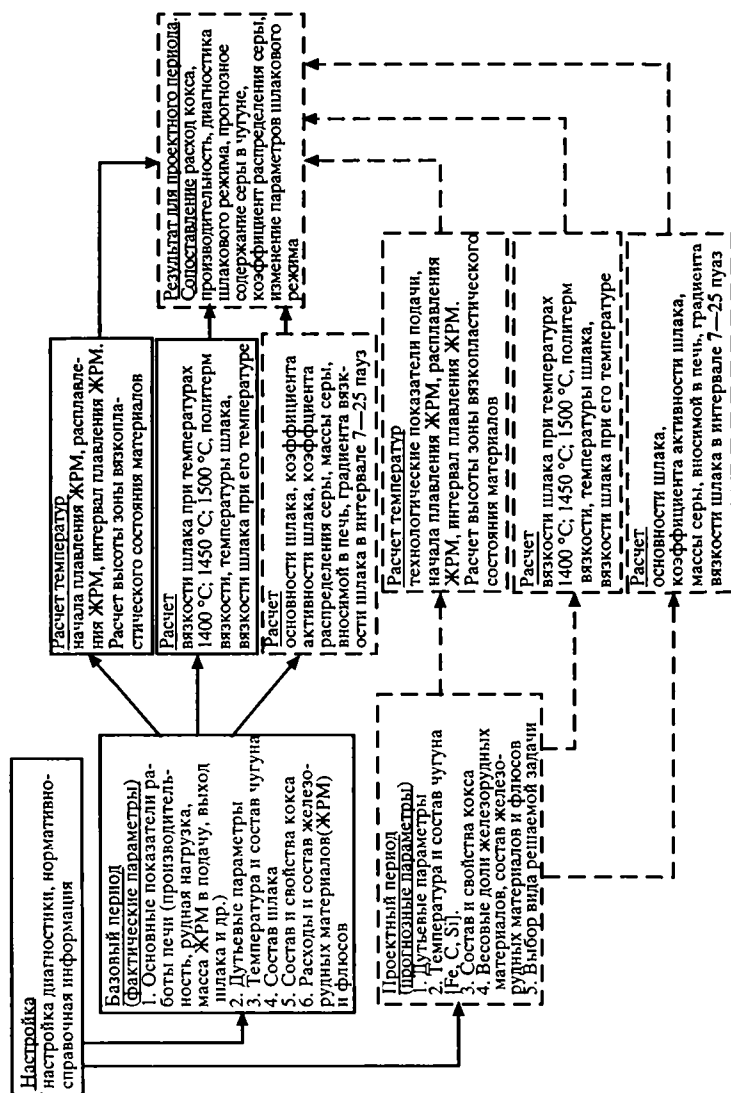


Рис. 2.19. Блок-схема моделирования шлакового режима доменной плавки

- химический состав флюсующих материалов;
  - состав кокса;
  - для задач 2 и 3 расходы флюсов;
- 2) дутьевые параметры:
- расход;
  - давление;
  - температура;
  - влажность;
  - содержание кислорода;
  - расход природного газа;
- 3) для задач 1 и 2 требуемая основность шлака.
4. В зависимости от решаемой технологической задачи:
- 1) рассчитывается для получения шлака заданной основности необходимый в проектный период расход флюсующих материалов (задача 1) или необходимое соотношение компонентов железорудной части шихты (задача 2);
- 2) осуществляется корректировка расхода кокса (из подсистемы теплового состояния);
- 3) осуществляется корректировка производительности (из подсистем теплового состояния и газодинамического режима).

Далее выполняется итерационная процедура (пункты 4.1, 4.2, 4.3) для корректировки состава шихты с целью офлюсования золы дополнительного кокса;

- 4) рассчитывается выход и состав шлака из шихты, используемой в проектный период (для всех технологических задач);
- 5) по приведенной выше методике оцениваются свойства шлака в проектный период:
- политерма вязкости шлака;
  - температурный интервал плавления железорудных материалов;
  - высота зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов;
  - градиент вязкости шлака;
  - коэффициент распределения серы между шлаком и чугуном;
  - содержание серы в чугуне;
- 6) выполняется диагностика шлакового режима в проектный период.

### Программное обеспечение

Программный продукт предназначен для решения технологических задач по выбору шлакового режима доменной плавки, реализует математическую модель шлакового режима доменного процесса,

Разработанный пакет прикладных программ реализован в среде Delphi, работает под управлением ОС WINDOWS, имеет широкие функциональные возможности с развитым оконным и графическим интерфейсом, обладает хорошими характеристиками процесса счета (скорость процесса вычислений); предусмотрены различные варианты функционирования пакета: как локального АРМ, в режиме интеграции с базами данных, а также возможен сетевой вариант функционирования пакета.

### Условия выполнения программы

Запуск программы осуществляется двойным щелчком левой кнопкой мыши на файле с именем *шлаковый режим.exe*

### Описание интерфейса программы

После вызова программы активизируется главная экранная форма, на закладках которой реализованы основные функции пакета.

Главное меню программы включает следующие пункты (рис. 2.20):

1. *Файл.*
2. *Настройка.*

Пункт меню «Файл» предназначен для загрузки ранее созданных наборов данных (подпункт «Открыть») и записи данных (подпункт «Сохранить»).

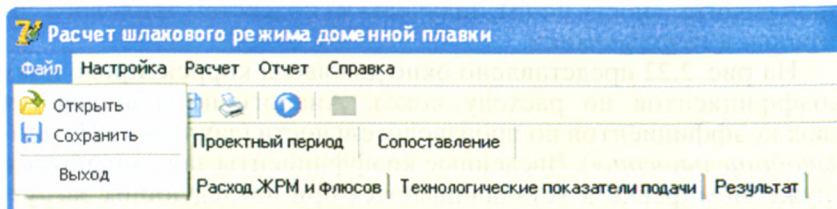


Рис. 2.20. Главное меню

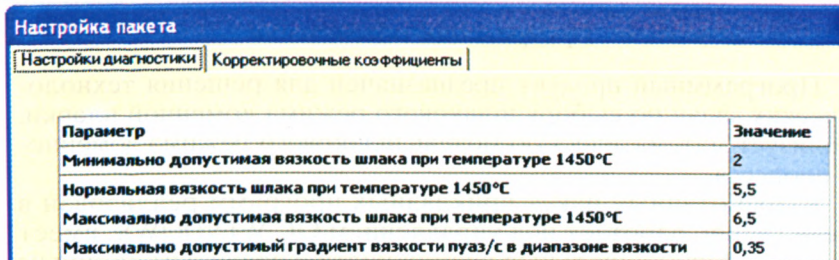


Рис. 2.21. Фрагмент окна «Настройка пакета»: закладка «Настройки диагностики»

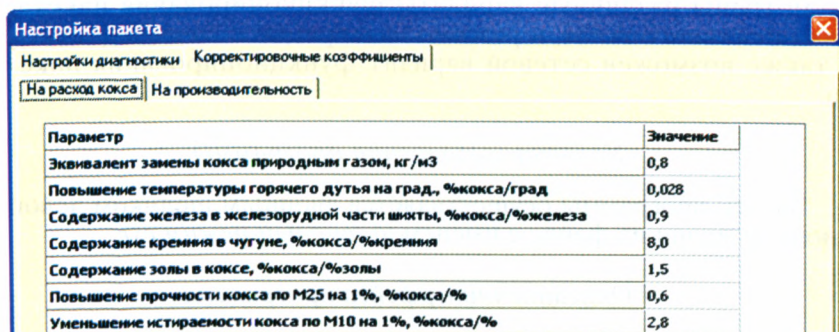


Рис. 2.22. Фрагмент окна «Настройка пакета»: закладка «Корректировочные коэффициенты»

Пункт меню «*Настройка*» активизирует окно «*Настройка пакета*» (рис. 2.21, рис. 2.22), в котором предусмотрены ввод и корректировка нормативно-справочной информации и настройка пакета для различных диапазонов составов шлака, а также для диагностики шлакового режима.

Корректировочные коэффициенты, характеризующие влияние условий плавки на ее показатели (удельный расход кокса и производительность печи), получены из подсистем теплового состояния и газодинамики.

На рис. 2.22 представлено окно для ввода корректировочных коэффициентов по расходу кокса. Аналогично выполняется ввод коэффициентов по производительности (закладка «*На производительность*»). Введенные коэффициенты запоминаются в служебном файле и устанавливаются при последующих загрузках программы.



Главная экранная форма позволяет выполнять ввод данных и расчеты для базового и проектного периодов, а также просматривать основные расчетные показатели в эти периоды в сопоставлении. Для выбора режима расчета предназначены кнопки:

- Базовый режим;
- Проектный режим;
- Сопоставление.

На рис. 2.23—2.26 приведены виды окна при расчете шлакового режима в базовый период.

На закладках «Исходные данные» (рис. 2.23) и «Расход ЖРМ и флюсов» (рис. 2.24) реализованы таблицы для ввода данных о параметрах доменного процесса и сырьевых условиях в базовый период. Перечень вводимых параметров приведен выше.

Результаты расчета параметров подачи и шлакового режима представлены соответственно на закладках «Технологические показатели подачи» (рис. 2.25) и «Результат» (рис. 2.26). На графике политермы вязкости (закладка «Результаты») высвечиваются координаты рабочей точки и указывается значение вязкости шлака при его температуре на выпуске.

Рис. 2.23. Таблицы для ввода параметров процесса в базовый период

Интерфейс программы «Расчет шлакового режима доменной плавки».

Вкладки: Базовый период, Проектный период, Сопоставление.

Закладки: Исходные данные, Расход ЖРМ и флюсов, Технологические показатели подачи, Результат.

**Показатели работы печи**

Параметр	Значение
Среднесуточное производство, т/сут	3615,6
Масса ЖРМ в подаче, кг	28000
Рудная нагрузка, т/т	3,66
Температура чугуна, °C	1450

**Параметры дутья**

Параметр	Значение
Расход дутья, м³/мин	2500
Температура дутья, °C	1193
Давление дутья, атм	2,69
Содержание кислорода, %	24,8
Расход природного газа, м³/т	93,8
Влажность дутья, г/м³	2,8

**Свойства кокса**

Параметр	Значение
Прочность кокса по M25, %	85,5
Истираемость кокса по M10, %	7,9
Горючая прочность кокса, %	62
Реакционная способность кокса, %	26
Содержание фракций >80мм, %	24

**Состав чугуна, %**

Элемент	Содержание, %
Fe	94,0
C	4,70
Si	0,51
S	0,020

**Состав шлака, %**

Элемент	Содержание, %
CaO	39,7
SiO2	37,3
Al2O3	11,43
MgO	7,93
TiO2	0,936
S	0,81
CaO/SiO2	1,06

**Состав кокса, %**

Элемент	Содержание, %
Зола (A)	11,9
Сера (Sk)	0,49
Летучие	0,99
Омел	86,62

**Состав золы кокса, %**

Элемент	Содержание, %
Fe	5,40
FeO	6,94
CaO	7,80
SiO2	48,10
Al2O3	24,60
MgO	2,00
TiO2	0
S	0

Рис. 2.23. Таблицы для ввода параметров процесса в базовый период

**Расчет шлакового режима доменной плавки**

Файл Настройка Расчет Отчет Справка

Базовый период Проектный период Сопоставление

Исходные данные Расход ЖРМ и флюсов Технологические показатели подачи Результат

**ЖРМ**

Наименование /	Массовая доля	Fe, %	FeO, %	CaO, %	SiO <sub>2</sub> , %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	MgO, %	TiO <sub>2</sub> , %	S, %
Аг.л.д/ф №2,3	0,267	58,5	12,5	8,72	5,88	1,75	1,63	0,24	0,028
Аг.л.д/ф №4	0,294	58,3	12,7	8,86	5,95	1,76	1,64	0,24	0,028
Окаты.СГПО	0,344	62,6	1,6	4,02	3,7	1,21	0,99	0,32	0,067
Окаты.Михайл.	0,095	63,3	0,94	1,49	7,25	0,23	0,25	0	0,010
Агломерат 1	0	57,81	12,7	8,84	5,98	1,69	1,95	0,22	0,05
Агломерат 2	0	57,1	12,1	7,72	6,77	2,18	2,26	2,93	0,05
Агломерат 3	0	57,2	7,94	4,54	4,64	2,49	2,14	2,26	0,05
Агломерат 4	0	57,82	7,94	0,54	8,64	2,49	2,14	2,26	0,05
Окатыши 1	0	62,6	1,6	4,02	3,7	1,21	0,99	0,32	0,05
Итого ЖРМ	1,0								

**Флюсы**

Наименование /	Расход, кг/подачу	Fe, %	FeO, %	CaO, %	SiO <sub>2</sub> , %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	MgO, %	TiO <sub>2</sub> , %	S, %
Известняк	0	0	0	51,0	0,8	0,05	3,5	0	0
Резерв	0	0	0	51,8	0,17	0,05	3,2	0	0
Кварцит	50	0	0	0	94,0	1,0	0	0	0

Рис. 2.24. Таблицы для ввода состава шихты в базовый период

**Расчет шлакового режима доменной плавки**

Файл Настройка Расчет Отчет Справка

Базовый период Проектный период Сопоставление

Исходные данные Расход ЖРМ и флюсов Технологические показатели подачи Результат

Наименование	Масса, кг/подачу	Fe, кг	FeO, кг	CaO, кг	SiO <sub>2</sub> , кг	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , кг	MgO, кг	TiO <sub>2</sub> , кг	S, кг
Аг.л.д/ф №2,3	7476	4373	935	652	440	131	122	18	2
Аг.л.д/ф №4	8232	4799	1045	729	490	145	135	20	2
Окаты.СГПО	9632	6030	154	387	356	117	95	31	6
Окаты.Михайл.	2660	1684	25	40	193	6	7	0	0
Кварцит	50	0	0	0	47	1	0	0	0
Кокс	7650								37
Зола Кокса	910	49	63	71	438	224	18	0	0
Всего	35700	16935	2222	1879	1767	623	377	69	43

Рис. 2.25. Фрагмент окна отображения показателей подачи в базовый период



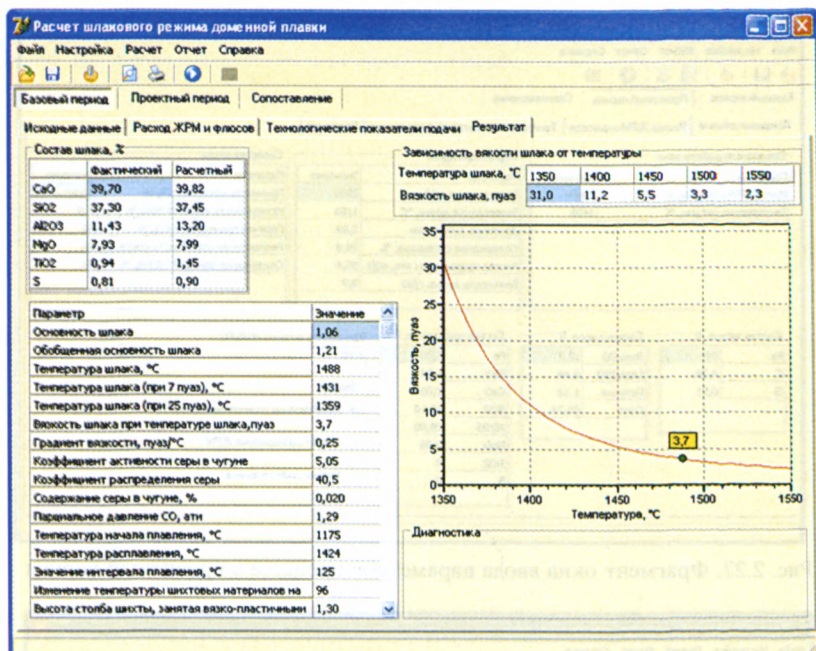


Рис. 2.26. Фрагмент окна отображения результатов расчета шлакового режима в базовый период

Вид главного окна при вводе данных о составе шихты и параметрах процесса в проектный период представлен на рис. 2.27 и рис. 2.28.

На закладке «Исходные данные» (рис. 2.27) вводятся масса железорудных материалов в подаче, планируемые параметры дутья, свойства кокса, содержание в чугуне [C], [Fe], [Si]. Содержание остальных компонентов в чугуне определяется расчетом. В области «Задача» пользователь имеет возможность выбора вида решаемой технологической задачи и ввода требуемой основности шлака для задач «Необходимое количество флюса» и «Расчет соотношения ЖРМ».

На закладке «Расход ЖРМ и флюсов» (рис. 2.28) пользователю предоставляется возможность выбора вида и ввода состава флюсующего материала. Если, используя указанный флюсующий материал, не удастся получить требуемую основность шлака, то пользователю выдается соответствующее сообщение и предлагается использовать в качестве флюса другой материал из имеющихся в базе данных.

Расчет шлакового режима доменной плавки

Файл Настройка Расчет Отчет Справка

Базовый период Проектный период Сопоставление

Исходные данные Расход ЖРМ и флюсов Технологические показатели подечи Результат

Показатели работы печи		Параметры дутья		Свойства кокса	
Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
Масса ЖРМ в подаче, кг	28000	Расход дутья, м <sup>3</sup> /мин	2500	Прочность кокса по М25, %	85,5
Температура чугуна, °C	1450	Температура дутья, °C	1186	Истираемость кокса по М10, %	7,9
		Давление дутья, атм	2,69	Горячая прочность кокса, %	62
		Содержание кислорода, %	24,8	Реакционная способность кокса, %	26
		Расход природного газа, м <sup>3</sup> /т	95,4	Содержание фракции >80мк, %	24
		Влажность дутья, г/м <sup>3</sup>	3,7		

Состав чугуна, %		Состав кокса, %		Состав золы кокса, %		Основность шлака CaO/SiO <sub>2</sub>
Элемент	Значение	Элемент	Значение	Элемент	Значение	
Fe	94	Зола (A)	12,7	Fe	5,40	1,10
C	4,70	Сера (S)	0,44	FeO	6,94	
Si	0,51	Летучие	1,12	CaO	7,80	
		Снег	85,74	SiO <sub>2</sub>	46,10	
				Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,60	
				MgO	2,00	
				TiO <sub>2</sub>	0	
				S	0	

Задача

☒ Необходимое количество флюса

☐ Расчет соотношения ЖРМ

☐ Расчет свойств шлака

Рис. 2.27. Фрагмент окна ввода параметров процесса в проектный период

Расчет шлакового режима доменной плавки

Файл Настройка Расчет Отчет Справка

Базовый период Проектный период Сопоставление

Исходные данные Расход ЖРМ и флюсов Технологические показатели подечи Результат

ЖРМ

Наименование /	Массовая доля	Fe, %	FeO, %	CaO, %	SiO <sub>2</sub> , %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	MgO, %	TiO <sub>2</sub> , %	S, %
Агл.афф №2,3	0,3	58,5	12,5	8,72	5,88	1,75	1,63	0,24	0,028
Агл.афф №4	0,3	58,3	12,7	8,86	5,95	1,76	1,64	0,24	0,028
Окаты.ССППО	0,4	62,6	1,6	4,02	3,7	1,21	0,99	0,32	0,067
Окаты.Июхайн.	0	63,3	0,94	1,49	7,25	0,23	0,25	0	0,010
Агломерат 1	0	57,81	12,7	8,84	5,98	1,69	1,95	0,22	0,05
Агломерат 2	0	57,1	12,1	7,72	6,77	2,18	2,26	2,93	0,05
Агломерат 3	0	57,2	7,94	4,54	4,64	2,49	2,14	2,26	0,05
Агломерат 4	0	57,82	7,94	0,54	8,64	2,49	2,14	2,26	0,05
Окатын 1	0	62,6	1,6	4,02	3,7	1,21	0,99	0,32	0,05
Итого ЖРМ	1,0								

Флюсы

Наименование /	Расход, кг/подачу	Fe, %	FeO, %	CaO, %	SiO <sub>2</sub> , %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	MgO, %	TiO <sub>2</sub> , %	S, %
Известняк	0	0	0	51,0	0,8	0,05	3,5	0	0
Резерв	0	0	0	51,8	0,17	0,05	3,2	0	0
Кварцит	152	0	0	0	94,0	1,0	0	0	0

Вид флюсового материала

Кварцит

Рис. 2.28. Фрагмент окна ввода состава шихты в проектный период



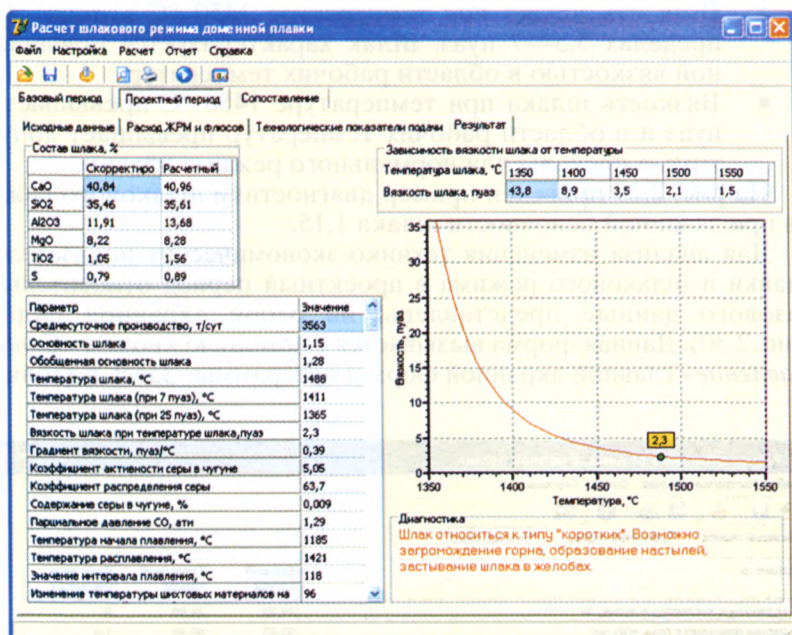


Рис. 2.29. Пример диагностики при расчете на заданную основность шлака 1,15

Результаты расчета шлакового режима в проектный период представлены на формах, аналогичных формам расчета шлакового режима в базовый период (рис. 2.25—2.26).

Поскольку должна быть учтена необходимость ввода большого количества данных, в программе предусмотрена проверка вводимой информации. Например, при ошибочном вводе основности шлака пользователю выдается сообщение «Основность должна быть между 1,01 и 1,25! Введите корректные данные!».

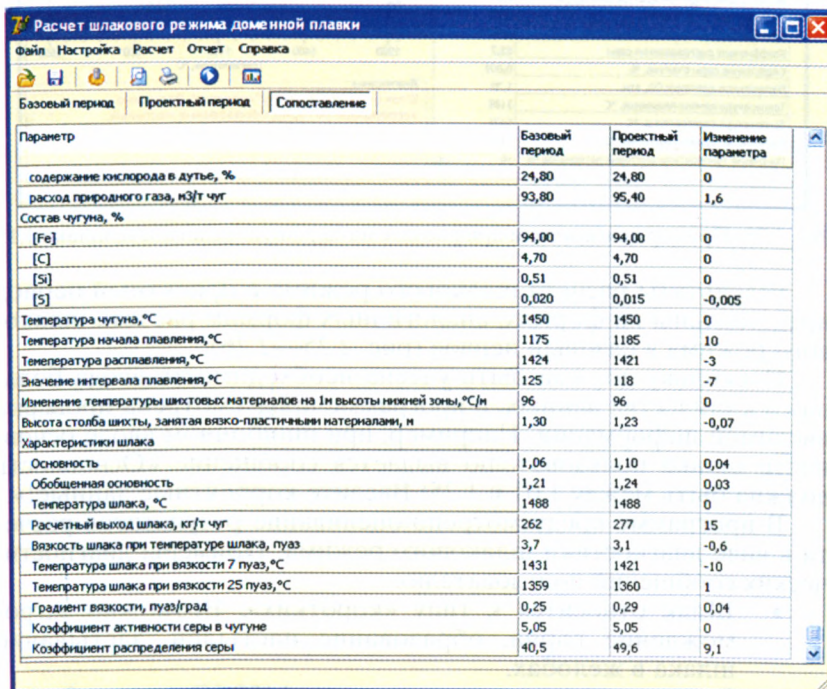
В программе предусмотрено оценивание результатов расчета в виде диагностики шлакового режима. Примеры диагностических сообщений пользователю:

- Шлак относится к типу «коротких». Возможно загромождение горна, образование настывлей, застывание шлака в желобах.
- Вязкость шлака при температуре 1450 °C меньше 2 пуаз. Шлак характеризуется малой вязкостью, обладает высокой агрессивностью к огнеупорной кладке и разрушает гарнисаж.

- Вязкость шлака при температуре 1450 °С находится в пределах 5,5—7 пуаз. Шлак характеризуется повышенной вязкостью в области рабочих температур.
- Вязкость шлака при температуре 1450 °С превышает 7 пуаз и в области рабочих температур превышает допустимые пределы для нормального режима плавки.

На рис. 2.29 приведен пример диагностики шлакового режима при заданной основности шлака 1,15.

Для анализа изменения технико-экономических показателей плавки и шлакового режима в проектный период относительно базового данные представлены на одной экранной форме (рис. 2.30). Данная форма вызывается с помощью кнопки «Сопоставление» главной экранной формы программы. Здесь в таблице



Параметр	Базовый период	Проектный период	Изменение параметра
содержание кислорода в дутье, %	24,80	24,80	0
расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	93,80	95,40	1,6
Состав чугуна, %			
[Fe]	94,00	94,00	0
[C]	4,70	4,70	0
[Si]	0,51	0,51	0
[S]	0,020	0,015	-0,005
Температура чугуна, °С	1450	1450	0
Температура начала плавления, °С	1175	1185	10
Температура расплавления, °С	1424	1421	-3
Значение интервала плавления, °С	125	118	-7
Изменение температуры шихтовых материалов на 1 м высоты нижней зоны, °С/м	96	96	0
Высота столба шихты, занятая вязко-пластичными материалами, м	1,30	1,23	-0,07
Характеристики шлака			
Основность	1,06	1,10	0,04
Обобщенная основность	1,21	1,24	0,03
Температура шлака, °С	1488	1488	0
Расчетный выход шлака, кг/т чугуна	262	277	15
Вязкость шлака при температуре шлака, пуаз	3,7	3,1	-0,6
Температура шлака при вязкости 7 пуаз, °С	1431	1421	-10
Температура шлака при вязкости 25 пуаз, °С	1359	1360	1
Градиент вязкости, пуаз/град	0,25	0,29	0,04
Коэффициент активности серы в чугуне	5,05	5,05	0
Коэффициент распределения серы	40,5	49,6	9,1

Рис. 2.30. Сопоставление параметров и показателей шлакового режима в базовый и проектный периоды



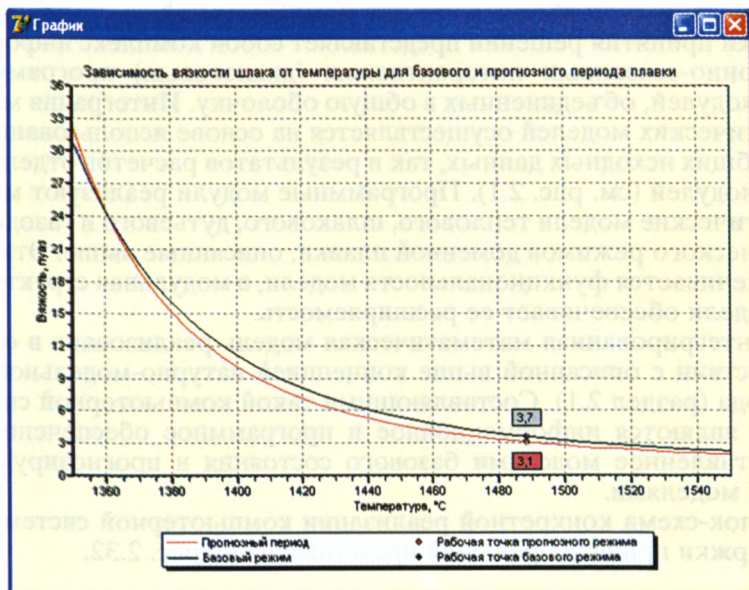


Рис. 2.31. Сопоставление политерм вязкости в базовый и проектный периоды

представлены все расчетные показатели шлакового режима для базового и проектного периодов, а также изменения этих показателей. Кнопка «График» на данной оконной форме активизирует окно с политермами вязкости шлака в базовый и проектный периоды (рис. 2.31).

## 2.5. Интегрированный пакет прикладных программ «Автоматизированное рабочее место инженерно-технического персонала доменной печи»

Интегрированный пакет прикладных программ «Автоматизированное рабочее место инженерно-технического персонала доменной печи» является компьютерной системой поддержки принятия решений, которая предназначена для оценки состояния процесса и проектных расчетов показателей работы доменной печи при колебаниях топливно-сырьевых условий, а также при изменении параметров плавки и требований, предъявляемых к химическому составу продуктов плавки [20, 133, 141, 142].

Программное обеспечение для компьютерной системы поддержки принятия решений представляет собой комплекс информационно-связанных интерактивных (диалоговых) программных модулей, объединенных в общую оболочку. Интеграция математических моделей осуществляется на основе использования как общих исходных данных, так и результатов расчетов отдельных модулей (см. рис. 2.1). Программные модули реализуют математические модели теплового, шлакового, дутьевого и газодинамического режимов доменной плавки, описанные выше. Этим обеспечивается функциональность модели, а модульная структура модели обеспечивает ее расширяемость.

Интегрированная математическая модель реализована в соответствии с описанной выше концепцией натурно-модельного подхода (раздел 2.1). Составляющими такой компьютерной системы являются информационное и программное обеспечение, представленное моделями базового состояния и прогнозирующими моделями.

Блок-схема конкретной реализации компьютерной системы поддержки принятия решений представлена на рис. 2.32.

### 2.5.1. Информационное обеспечение компьютерной системы

Информационным обеспечением компьютерной системы являются данные распределенной базы данных доменного цеха. Это обеспечивает получение и представление информации о ходе технологического процесса в реальном времени. С помощью SQL-запросов и хранимых процедур формируются необходимые для расчетов наборы данных о параметрах и показателях процесса, которые включают [143, 144]:

- 1) всю доступную информацию о входных и выходных параметрах процесса за прошедший период (*базовый период*). Наборы данных по базовому периоду формируются в фоновом режиме, независимо от работы приложения, по мере сбора и поступления информации о доменном процессе в базу данных доменного цеха, при этом происходит усреднение информации за каждые смену и сутки. Результаты выполненных запросов сохраняются в отдельном файле, размещенном на сервере базы данных;
- 2) текущие топливно-сырьевые условия и режимные параметры процесса (*текущий период*). Наборы данных по теку-



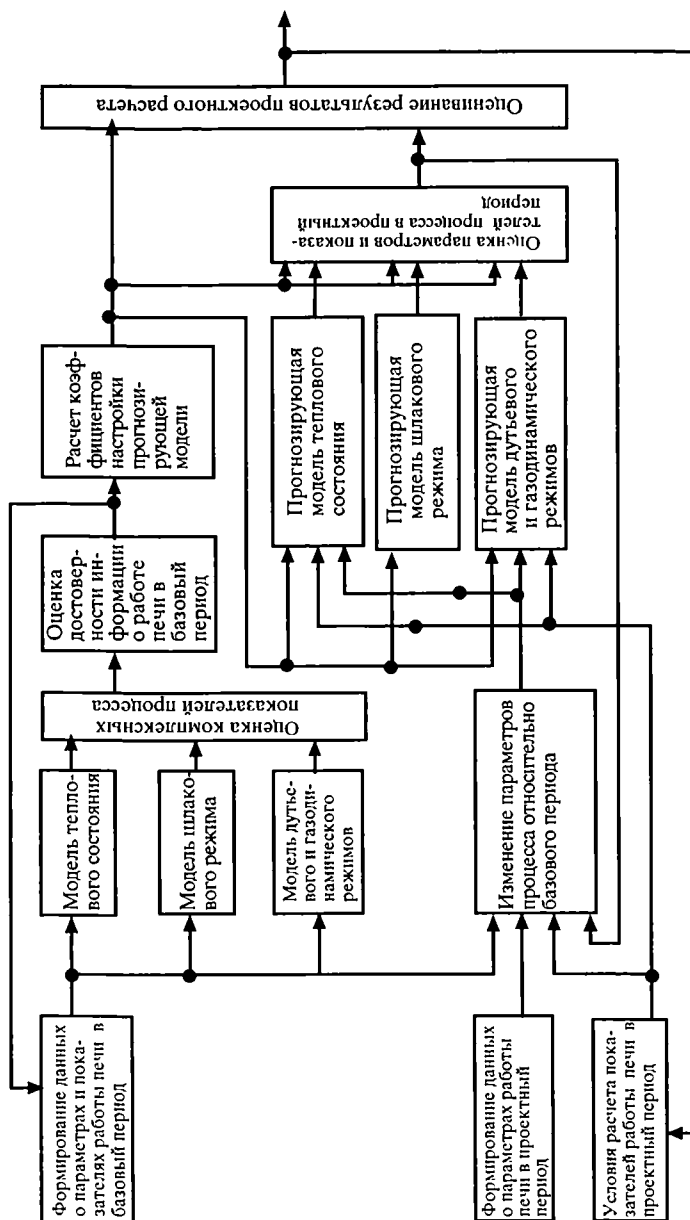


Рис. 2.32. Блок-схема компьютерной системы поддержки принятия решений

Таблица 2.4

**Перечень исходных данных компьютерной системы**

Показатели	Набор данных	
	Базовый период	Текущий период
Конструктивные параметры доменной печи (параметры профиля, характеристики фурм, уровень засыпи)	+	+
Удельные расходы шихтовых материалов	+	–
Химический состав шихтовых материалов	+	+
Гранулометрический состав шихтовых материалов	+	+
Состав подачи	–	+
Параметры комбинированного дутья (расход дутья, давление, температура, влажность, содержание кислорода, расход природного газа)	+	+
Производительность	+	–
Состав (C, Si, Mn, S, P, Ti, V и др.) и температура чугуна	+	–
Состав шлака (CaO, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, TiO <sub>2</sub> и др.)	+	–
Параметры колошникового газа (температура, химический состав, вынос пыли, выход шламов)	+	–
Перепады давления по высоте печи	+	–

щему периоду формируются при каждой загрузке приложения и во время расчетов по требованию пользователя.

Перечень необходимых параметров и показателей процесса в каждом из наборов данных приведен в табл. 2.4.

### 2.5.2. Программный модуль «Оценка состояния процесса»

Программный модуль «Оценка состояния процесса» позволяет пользователю количественно оценить степень развития основных процессов доменной плавки (теплообмена, восстановления, шлакообразования, газодинамики) для различных периодов работы печи. В основе методики расчета используется модель базового состояния доменного процесса.

Предусмотрен вариант реализации интерфейса задачи на Intranet-сайте доменного цеха, который содержит оперативную информацию о ходе доменного процесса на всех печах ОАО ММК в различные периоды, а также результаты работы печей и цеха (рис. 2.33). Такая реализация программного продукта обеспечивает доступ к информации о процессе широкому кругу пользователей.

Для вызова программы на WEB-странице необходимо нажать кнопку «Оценка состояния печи». Далее пользователь должен указать номер доменной печи и дату, для которых будут рассчитаны показатели процесса. После этого на страницу будет выведена таблица с расчетными показателями.

Исходной информацией для расчетов является набор данных о параметрах и показателях работы доменной печи в базовый период, соответствующий указанной пользователем дате. Фрагмент отображения основных параметров, характеризующих тепловой, дутьевой, газодинамический и шлаковый режимы доменной плавки процесса на Intranet-сайте доменного цеха, представлен на рис. 2.34.

Всего в модели рассчитываются около 300 показателей, часть из которых являются промежуточными данными и необходимы для анализа процесса, другая часть — комплексными показателями

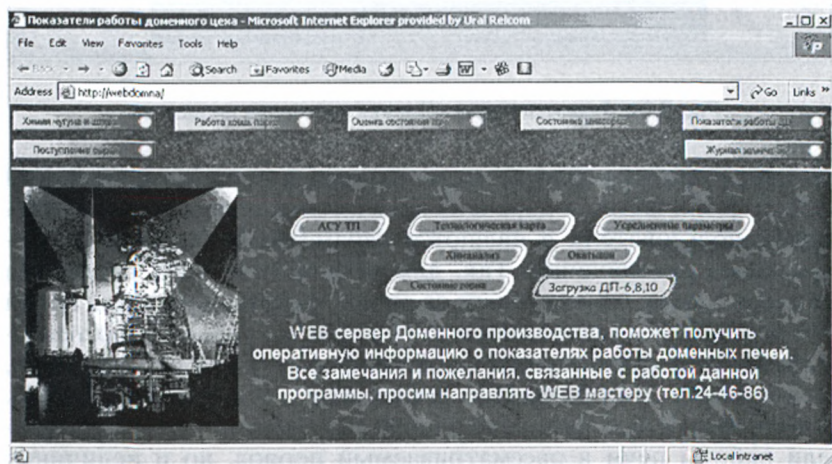


Рис. 2.33. Intranet-сайт доменного цеха

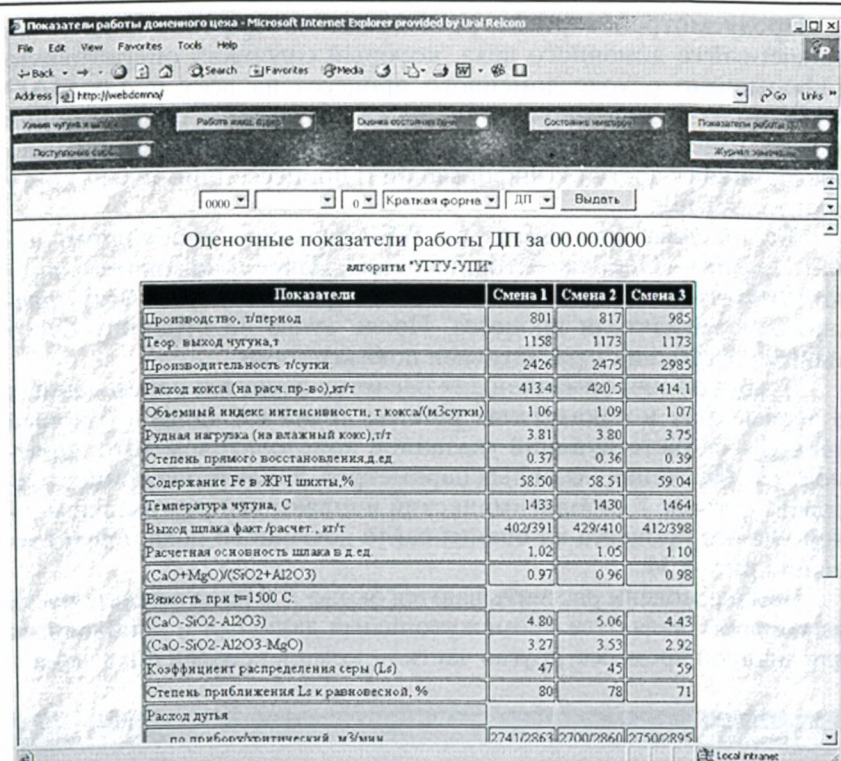


Рис. 2.34. Фрагмент окна «Оценка состояния процесса»

ми, характеризующими развитие основных процессов доменной плавки. Количество и перечень показателей определяются категорией пользователя и являются параметрами настройки программного обеспечения. Так, для технологического персонала доменного цеха, отвечающего за анализ работы доменных печей и цеха в целом и принимающего решение по управлению технологией, отчет формируется в полной форме, а для мастера печи, отвечающего за соблюдение технологии, — в краткой форме. Полная форма в отличие от краткой включает не только показатели работы печи в рассматриваемый период, но и величины, оценивающие степень развития основных явлений доменной плавки при данных сырьевых условиях и режимных параметрах.

Надежность расчетов во многом определяется достоверностью исходных данных. В программе предусмотрена оценка достоверности входной информации о параметрах процесса. В ее основе лежат анализ многовариантных оценок и соответствие рассчитанных комплексных показателей, в качестве которых выбраны степень прямого восстановления, теоретическая температура горения, вязкость шлака, степень уравнивания шихты газовым потоком, допустимым значениям. В случае сомнительной информации о параметрах процесса пользователю выдается предупреждение, и соответствующие расчетные показатели в таблице выделяются цветом.

### **2.5.3. Программный модуль «Проектный расчет показателей доменного процесса»**

В рамках проектного расчета программное обеспечение в диалоговом режиме позволяет оценить показатели работы печи при изменении следующих параметров:

- сырьевые условия по металлической части шихты:
  - состав и соотношение расходов железорудных материалов в подаче;
  - расход металлодобавок;
  - расход флюсов;
  - химический состав любого компонента шихты;
- сырьевые условия по коксу:
  - расход;
  - технический состав;
  - состав золы;
- параметры комбинированного дутья:
  - расход и давление;
  - температура и влажность;
  - содержание кислорода;
  - расход природного газа.

Предусмотрены следующие варианты расчета:

- шлакового режима:
  - расчет основности шлака ( $\text{CaO/SiO}_2$ ) при заданном соотношении железорудных материалов и расходе флюсов;
  - расчет требуемого расхода одного из флюсов для получения шлака заданной основности;
  - расчет соотношения двух указанных железорудных материалов для получения шлака заданной основности;



Оценка состояния печи

Дата: 00.00.0000

☐ Краткий

Дата: 00.00.0000, ДП

Показатели	Смена 1	Смена 2	Смена 3
Производство, т/период	801	817	565
Теор. выход чугуна, т	1158	1173	1173
Производительность т/сутки			
фактическая	2426	2475	2985
баланс кислорода	3251	3240	3214
баланс углерода	3403	3449	3448
баланс железа	3510	3555	3556
Расход кокса (на раскисление), кг/т	413.4	420.5	414.1
Расход кокса (максимальный), кг/т	360.9	377.9	362.5
Объемный индекс интенсивности, т/коп	1.06	1.09	1.07
Ручная нагрузка (на влажный кокс), т/т	3.81	3.80	3.75
Степень прямого восстановления, ед.	0.37	0.36	0.39
Содержание Fe в ЖРЧ шихты, %	58.50	58.51	59.04
Содержание в чугуне в %			
Si	0.44	0.61	0.94
Mn	0.65	0.44	0.48
S	0.018	0.018	0.015
P	0.046	0.047	0.053
Ti	0.043	0.055	0.081
Si	0.018	0.020	0.022
Температура чугуна, С	1433	1430	1464
Выход шлака, кг/т			
фактический	402	429	412
расчет	331	310	308
Основность шлака в ед.:			
фактическая	1.06	1.04	1.07
расчет	1.02	1.05	1.10
Содержание в шлаке в %			
CaO	39.82	39.42	40.85
SiO <sub>2</sub>	37.66	38.02	38.10

Состав шихты

Дутьевой режим

Газодинамический режим

Шлаковый режим

Тепловой режим

Ход восстанов. процессов

Факторный анализ

Рис. 2.37. Форма «Оценка состояния печи»

ход чугуна, количество шлакообразующих оксидов, содержание железа, основность.

Подпункт «Дутьевой режим» приводит к появлению окна, в котором представлены параметры комбинированного дутья и фурменного очага (рис. 2.39).

Подпункт «Газодинамический режим» отображает в специальном окне расход, давление дутья, общий и, если контролируются, частные перепады давления в сопоставлении с их критическими значениями. Критические значения соответствуют максимально допустимой степени уравнивания газового потока при данных параметрах комбинированного дутья и газодинамических характеристиках слоя шихтовых материалов (порозность, эквивалентный диаметр куска), которые также отображаются в окне (рис. 2.40).

Подпункт «Шлаковый режим» выводит на экран форму с двумя закладками: «Таблица» (рис. 2.41, а) и «График» (рис. 2.41, б). В таблице приводится расчетный состав шлака в сопоставлении с фактическим составом, основность, вязкость,

Пункт меню «Базовый режим» предназначен для выполнения расчетов показателей работы печи в базовый период.

В качестве исходного используется набор данных о параметрах и показателях работы печи в базовый период, непосредственно предшествующий моменту расчетов, продолжительностью 1 смена. Период работы печи может также задаваться пользователем (см. далее). Для расчетов используется модель базового состояния доменного процесса.

Подменю содержит команды, представленные на рис. 2.36.

Подпункт «Оценка показателей работы печи» активизирует форму, в которой приведены основные показатели процесса (аналогично задаче «Оценка показателей процесса») в базовый период в сопоставлении с показателями работы печи в две ближайшие смены (рис. 2.37). Пользователю предоставляется возможность выбрать полную или краткую формы отчета. Осуществляется оценка достоверности информации о параметрах процесса. В случае сомнительной информации выдается сообщение, и значения соответствующих параметров выделяются цветом. Справа на форме для удобства пользователей имеются кнопки, дублирующие остальные подпункты пункта главного меню «Базовый период».

Подпункт «Состав шихты» вызывает появление окна с расходами и составами использованных в базовом периоде шихтовых материалов (рис. 2.38). Здесь же приводятся расчетные параметры шихты: для железорудной части шихты, флюсов, кокса и шихты в целом выводятся удельный расход, теоретический вы-

Прогноз работы доменной печи										
Файл		Базовый период		Настройка базового периода						
Базов	Оценка состояния печи			период						
<div>Состав шихты</div> <div>Дутьевой режим</div> <div>Газодинамический режим</div> <div>Шлаковый режим</div> <div>Тепловой режим</div> <div>Ход восстановительных процессов</div> <div>Факторный анализ</div>				ПОСЛЕДНЯЯ ПЕРЕШИХТОВКА						
				Смена		Подача		Сумма руд, т		
				3		1		28.0		
				ЖЕЛЕЗОРУДНЫЙ МАТЕРИАЛ						
				г	Fe	CaO	SiO2	FeO	CaO/SiO	Al2O3
				54.80	11.3	7.82	12.3	1.45	1.54	
				61.70	4.4	3.84	0.0	1.15	1.39	
				62.60	0.9	8.60	0.0	0.10	0.23	
			Окат.	3.52						

Рис. 2.36. Подпункты меню «Базовый режим»



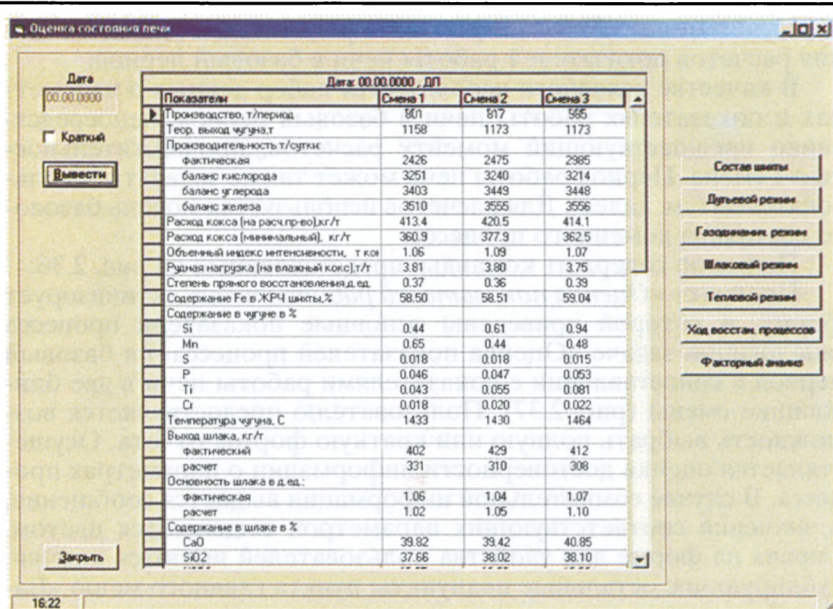


Рис. 2.37. Форма «Оценка состояния печи»

ход чугуна, количество шлакообразующих оксидов, содержание железа, основность.

Подпункт «Дутьевой режим» приводит к появлению окна, на котором представлены параметры комбинированного дутья и фурменного очага (рис. 2.39).

Подпункт «Газодинамический режим» отображает в специальном окне расход, давление дутья, общий и, если контролируются, частные перепады давления в сопоставлении с их критическими значениями. Критические значения соответствуют максимально допустимой степени уравнивания газового потока при данных параметрах комбинированного дутья и газодинамических характеристиках слоя шихтовых материалов (порозность, эквивалентный диаметр куска), которые также отображаются в окне (рис. 2.40).

Подпункт «Шлаковый режим» выводит на экран форму с двумя закладками: «Таблица» (рис. 2.41, а) и «График» (рис. 2.41, б). В таблице приводится расчетный состав шлака в сопоставлении с фактическим составом, основность, вязкость,



Состав шихты ДП № Дата: 00.00.0000 Смена: 1

Состав шихты

ЖЕЛЕЗОСЫРЬЯНЫЙ МАТЕРИАЛ													
Наименование	Расход, кг/т чугуна	Fe	CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	S	P	25-50	15-25	5-15
Агл. фоб.	990.7	56.26	10.49	6.92	11.28	1.4	1.82	0	0.035	0	26.4	37.3	22.8
Окаг.	524.5	62.23	4.2	3.74	0.94	1.28	0.88	0	0.048	0	0	0	17
Окаг.	58.3	63.05	0.97	8.66	0	0.14	0.1	0	0.005	0	0	0	17

МЕТАЛЛОДОБАВКИ				
Наименование	Расход, кг/т чугуна	Fe	CaO	SiO <sub>2</sub>

ФЛЮСЫ						
Наименование	Расход, кг/т чугуна	Fe	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
Кварцит	10.9	0	0	97.5	0.8	0

КОКС													
Наименование	Расход, кг/т чугуна	Влага	Зола	[S]	Летуч.	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	>80	60-80	40-60	25-40	<25
Зола с блока 3	413.4	0	13.2	0.47	1.2	4.8	50	24.7	18.2	41.9	33.4	3.8	2.8

Параметры шихты				
Показатель	ЖРМ	Флюсы	Кокс	Всего
Расход, кг/т расходуемого	1573.5	10.9	413.4	2411.2
Теор. выход чугуна, т/период	1157.6	0.0	0.7	1158.3
Кол-во шлакообраз, т/период	254.0	94.1	46.7	394.8
Содержание Fe, %	57.53	0.00	-	45.78
CaO / SiO <sub>2</sub> , д.ед.	1.36	0.00	-	0.99

Закреть

Рис. 2.38. Фрагмент формы «Состав шихты для базового периода»

Дутьевой режим ДП № Дата: 00.00.0000 Смена: 1

Дутьевой режим	
Параметр	Значение
Расход дутья (расчёт), м <sup>3</sup> /мин	2657
Температура дутья, град	1189
Давление дутья, ати	2.60
Расход природного газа, м <sup>3</sup> /ч	11 515
Содержание кислорода в дутье, %	25.60
Число работающих фурм, шт	20
Диаметр фурм, мм	140
Скорость истечения, м/с	229
Кинетическая энергия дутья, кг*м/с	7974
Протяженность зоны циркуляции, мм	1284
Протяженность окислительной зоны, мм	1643
Относительная площадь окислительных зон, %	55

Закреть

Рис. 2.39. Форма «Дутьевой режим»

**Газодинамический режим ДПН\*** Дата: 00.00.0000 Смена: 1

Показатели | График (перепад давления)

Перепад давления, атм		Скорость фильтрации газа, м/с		Состав газа, %	
Верхний	0.403	В области колошника:		В области колошника:	
Нижний	0.939	· при нормальных условиях	1.93	CO	23.50
Общий	1.342	· действительная	3.80	CO2	21.00
Степень уравновешивания шикты, %		В области распара:		В области распара:	
Расчетная	43.16	· при нормальных условиях	0.76	N2	6.40
Критическая	55.00	· действительная	4.07	N2	49.10
Расход дутья, м3/мин		В области горна:		В области горна:	
По показаниям КИП	2598	· при нормальных условиях	2.12	CO	50.05
Критический	2933	· действительная	11.66	N2	0.73
Порозность слоя, м3/м3		Эквивалентный диаметр куска, мм		N2	
ЖРМ	0.41	ЖРМ		49.22	
Кокса	0.46	Кокса		CO	
Шикты	0.43	Шикты		41.83	
				N2	
				1.37	
				56.80	

Газодинамические параметры слоя шикты		Температура горения, °C
<u>Рабочая точка:</u>	<u>Критическая точка:</u>	2214
Перепад давления, атм.: 1.240	Перепад давления критич./общий, атм.: 1.580/1.682	
Расход дутья, м3/мин.: 2598	Расход дутья, м3/мин.: 2933	

OK

Рис. 2.40. Форма «Газодинамический режим»

температура плавления шлака, его выход. Ниже в таблице приведены значения политермы вязкости шлака. На графике строится кривая политермы вязкости реального шлака в сопоставлении с политермами вязкости шлаков, основность которых отличается от основности реального шлака на  $\pm 0,05$ .

Это позволяет оценить область возможных значений вязкости шлака при колебаниях его основности. На графике отмечены также горизонтальные линии, соответствующие температуре плавления шлака (25 пауз) и предельно допустимой вязкости для нормального хода плавки при температуре выпуска (7 пауз).

Подпункт «Тепловой режим» активизирует форму с параметрами, характеризующими тепловую работу печи (рис. 2.42): теоретическая температура горения, содержание кремния в чугу-

а

Шлаковый режим ДП № Дата: 00.00.0000 Смена: 1

Таблицы График

Шлаковый режим	
Параметр	Значение
Состав шлака (факт.), %	
CaO	40.79
SiO <sub>2</sub>	37.37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.86
MgO	7.57
Основность шлака CaO/SiO <sub>2</sub> фактическая / расчетная, доли	1.09
Выход шлака (расчетный), кг/чугуна	300
Вязкость шлака (t=1500 град), пуаз	2.6
Температура плавления шлака, град	1364
Коэффициент распределения серы (факт.)	63

Политерма вязкости шлака							
Температура, С	1350	1375	1400	1425	1450	1475	1500
Вязкость, пуаз	38.0	18.3	10.2	6.4	4.4	3.3	2.6

Закреть

б

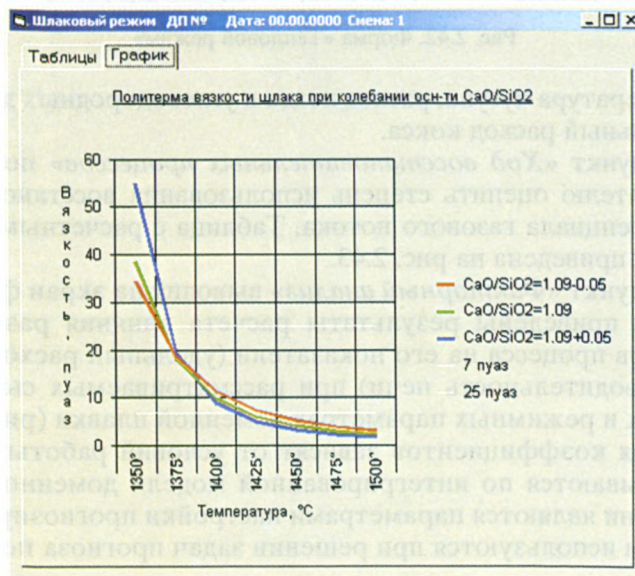


Рис. 2.41. Форма «Шлаковый режим»:  
а — таблица; б — график



Тепловой режим ДП № Дата: 00.00.0000 Смена: 1

Тепловой режим	
Параметр	Значение
Теор. температура горения, град	2214
Содержание кремния в чугуна, %	0.50
Температура чугуна, град С	1446
Расход кокса (сухого) на расчетное производство / минимальный, кг/т чугуна	413.4
	377.6
Расход природного газа, м3/т чугуна	68.0
Содержание кислорода в дутье, %	25.60
Температура дутья, град	1189
Влажность дутья, г/м3	14.45

Заккрыть

Рис. 2.42. Форма «Тепловой режим»

не, температура чугуна, расход кокса и углеводородных добавок, минимальный расход кокса.

Подпункт «Ход восстановительных процессов» позволяет пользователю оценить степень использования восстановительного потенциала газового потока. Таблица с расчетными параметрами приведена на рис. 2.43.

Подпункт «Факторный анализ» выводит на экран форму, в которой приведены результаты расчета влияния различных факторов процесса на его показатели (удельный расход кокса и производительность печи) при рассматриваемых сырьевых условиях и режимных параметрах доменной плавки (рис. 2.44). Значения коэффициентов зависят от условий работы печи и рассчитываются по интегрированной модели доменного процесса. Они являются параметрами настройки прогнозирующей модели и используются при решении задач прогноза показателей.

Пункт меню «Настройка базового режима» предназначен для выбора пользователем периода работы печи.

Ход восстановительных процессов	
Параметр	Значение
▶ Расход дутья (по прибору), м <sup>3</sup> /т чугуна (м <sup>3</sup> /ч)	921
	155 871
Расход дутья (расчёт), (м <sup>3</sup> /т чугуна)/(м <sup>3</sup> /ч)	941
	159 393
Выход колошникового газа, (м <sup>3</sup> /т)/(м <sup>3</sup> /ч)	1457
	246 654
Температура колошникового газа, град С	255
Состав колошникового газа, %	
CO	23.5
CO <sub>2</sub>	21.0
H <sub>2</sub>	6.4
N <sub>2</sub>	49.1
Степень использования CO факт / max, %	0.472
	0.539
Степень использования H <sub>2</sub> , %	0.384
Степень прямого восстановления, доли	0.372

Рис. 2.43. Форма «Ход восстановительных процессов»

По умолчанию в качестве базового периода принимается работа печи за предыдущую смену, по которой в базе данных имеется полная информация. Этот режим условно назван «Автоматический».

Перед каждым проектным расчетом выполняется оценка достоверности информации. В случае недостоверной информации выдается соответствующее сообщение и пользователю предлагается выбрать другой базовый период. Другой базовый период можно выбрать и в случае недостаточности по субъективной оценке пользователя такой проверки.

Для выбора базового периода предусмотрена возможность указания новой даты и смены. Это должен быть период продолжительностью одна смена, в течение которого печь, по субъективному мнению пользователя, работала стабильно, и в базе данных имеется вся необходимая информация. Режим расчета по набору данных, соответствующих указанной пользователем дате, условно назван «Установленный».



Факторный анализ ДЛН* Дата: 00.00.0000 Смена: 1			
Параметр	Расход кокса, %	Расход кокса, кг/т	Производительность, %
Повышение содержания Fe в шихте на 1% ( $\text{CaO/SiO}_2 = \text{const}$ )	-1.82	-7.51	1.79
Повышение расхода мет. добавок на 10 кг/т	-0.35	-1.46	0.35
Уменьшение расхода известняка на 10 кг/т	0.00	0.00	0.00
Уменьшение содержания золы в коксе на 1%	-2.05	-8.46	0.22
Уменьшение содержания [Si] на 0,1%	-0.73	-3.00	1.12
Уменьшение содержания [Mn] на 0,1%	-0.19	-0.78	0.18
Уменьшение содержания [P] на 0,1%	-0.95	-3.93	0.94
Повышение содержания [S] на 0,01%	0.00	0.00	0.00
Повышение основности шлака на 0,01 доли	-0.01	-0.05	0.02
Повышение температуры дутья на 10 град	-0.24	-1.00	0.37
Обогащение дутья кислородом на 1%	0.24	0.97	2.36
Уменьшение влажности дутья на 1 г/м3	-0.22	-0.90	0.29

Рис. 2.44. Форма «Факторный анализ»

Рис. 2.45. Форма «Установка периода»

В программе реализована возможность сопоставления данных о работе печи в автоматически выбранный и установленный пользователем периоды с показателями работы печи в период, характеризующий высокими показателями процесса. Дата и смена «Наилучшего» периода определяется пользователем на основе субъективной оценки.

Для ввода даты «Установленного» и «Наилучшего» периодов необходимо выбрать подпункт меню «Настройка базового периода» — «Установка базового периода». Активизируется окно «Установка периода» (рис. 2.45). В этом окне присутствует возможность задания даты и смены для указанного периода.

Для установки режима выбора базового периода необходимо выбрать подпункт меню «Настройка базового периода» — «Выбор базового периода». Активизируется окно «Базовый период» (рис. 2.46).

Базовый период

Значения показателей данного базового периода		
Параметр	Автоматич.	Установл.
Расход сух. кокса, (т в подачу) / (кг/т)	456.93	476.60
Расход вл. кокса, (т в подачу) / (кг/т)	472.92	501.38
Расход ЖРМ, (т в подачу) / (кг/т)	1623.21	1599.90
Расход металлодобавок, (т в подачу) / (кг/т)	0.00	0.00
Расход флюсов, (т в подачу) / (кг/т)	9.84	10.90
Рукавая нагрузка, т/т	3.55	3.36
Содержание железа в ЖРМ, %	57.93	57.86
Производительность (факт), т/сут	2580	2302
Производительность (Fe), т/сут	3265	3114
-----		
[Si], %	0.63	0.66
[S], %	0.020	0.022
Основность шлака, д.ед.	1.03	1.01
Вязкость, пуаз	2.99	3.43
Выход шлака, кг/т	332	346
-----		
Температура дутья, С	1094	1146
Влажность дутья, г/м3	3.0	3.0
Кислород, %	25.70	27.00
Природный газ, (м3/мин) / (м3/т)	226 / 099.6	216 / 099.9
Расход дутья (по прибору), (м3/мин) / (м3/т)	2675 / 1180.	2640. / 1221.
Выход газа, м3/мин	3704	3708
Теоретическая температура горения, С	2005	2174
Площадь окислительных зон, %	46.1	50.7
Перепад давления / крит., атм	1.24 / 1.50	1.20 / 1.48
Степень уравнивания шихты, %	45.5	44.7

Выбранный период (базовое состояние)

Печь №

Дата периода

Дата:

Смена:

Выбор режима

☒ Автоматический

☐ Установленный

Рис. 2.46. Форма «Базовый период»

Также имеется возможность указать, какой режим выбора базового периода будет установлен по умолчанию при последующих загрузках программы. Для этого следует выбрать требуемый тип режима и нажать кнопку «Установить по умолчанию».

Главное окно программы (рис. 2.47) предназначено для выполнения проектного расчета и представляет собой экран для ввода задаваемых параметров процесса и условий расчета показателей.

В главном окне программы отображается информация о параметрах процесса в проектный период. По умолчанию значения параметров равны их значениям в текущий период, то есть в период, непосредственно предшествующий расчету. Данные о текущих параметрах процесса автоматически загружаются из базы данных в момент загрузки программного модуля и по требованию пользователя посредством кнопки «Обновить», расположенной справа на главном окне.

Окно условно можно разделить на следующие блоки:



Прогноз работы доменной печи

Файл Базовый период Настройка базового периода

Базовый период Текущий период Проектный период

ПОСЛЕДНЯЯ ПЕРЕШЕСТОВКА												
Печь	Дата	Смена	Подана	Смена руд, т	Смена кокса, т							
0	00.00.0000	2	1	30.0	7.6							

ЖЕЛЕЗОРУДНЫЙ МАТЕРИАЛ															
Наименование	Колесо, т/подачу	Fe	CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO	CaO/SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	S	P	25-50	15-25	5-15	<5
Агл. фаб.	19.71	55.40	11.2	6.90	12.7	1.63	1.52	1.69	0.075	27.7	34.7	26.2	11.4		
Окаг.	6.00	62.50	3.9	3.89	0.0	1.01	1.24	0.96	0.042	0.0	73.1	25.3	1.6		
Окаг.	4.29	62.50	0.8	9.24	0.0	0.08	0.20	0.39	0.008	0.0	58.7	32.5	9.7		

МЕТАЛЛОДОБАВКИ						
Наименование	Колесо, т/подачу	Fe	CaO	SiO <sub>2</sub>		
Известняк	0.0	0.0	51.6	0.1	0.03	3.7

ФЛЮСЫ												
Наименование	Колесо, т/подачу	Fe	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO						
Известняк	0.0	0.0	51.6	0.1	0.03	3.7						

КОКС													
Наименование	Колесо, т/подачу	Влага	Зола	Летуч.	[S]	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	>80	60-80	40-60	25-40	<25
с блока 3	7.6	0.0	12.2	1.1	0.50	4.8	50.0	24.7	18.2	41.9	33.4	3.8	2.8

АСУТП				
Температура, С	Влажность, г/м <sup>3</sup>	Кислород, %	Прогр. газ, м <sup>3</sup> /ч	
1188	5.0	27.4	5209	

☐ Расчёт на заданное колесо подачи

ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА			
Период	Si, %	Осн. N	Форм.
Текущий	0.350	1.03	20
Проектный			20

Вид флюсующего материала: Известняк

Расчётный параметр: Рудная нагрузка

Расчёт

Выход

10:28 00.00.0000 Данные считаны 00.00.0000 10:25:55 NUM INS

Рис. 2.47. Форма «Прогноз работы доменной печи» (главное окно)

1. Блок А. Объект моделирования. Указываются номер печи и периоды работы, принятые в качестве текущего и базового. При отсутствии в базе данных сведений о работе печи в период, непосредственно предшествующий времени моделирования, предусматривается ручной ввод даты периода, принимаемого за текущий.
2. Блок В. Параметры плавки. Здесь приведена следующая информация:
  - сырьевые условия:
    - состав последней подачи;
    - химические и гранулометрические составы используемых шихтовых материалов (железородных материалов, металлодобавок, флюсов, кокса);
  - параметры комбинированного дутья, усредненные за последний час работы печи:
    - температура;



- влажность дутья;
  - содержание кислорода в дутье;
  - расход природного газа;
  - оценка состава продуктов плавки. По умолчанию устанавливаются расчетные по математической модели содержание кремния в чугуна и основность шлака для приведенных выше сырьевых и режимных условий. Содержание кремния в чугуна в текущий период может корректироваться пользователем по результатам экспертной оценки.
3. Блок С. Проектные значения состава продуктов плавки: основность шлака и содержание кремния в чугуна.
4. Блок D. Условия проектного расчета:
- условия расчета шлакового режима:
    - расход указанного пользователем флюса для получения шлака заданной основности;
    - расчет основности шлака при заданных сырьевых условиях без корректировки расхода флюсов;
  - условия расчета производительности печи:
    - расчет на заданное количество подач;
    - расчет на постоянный расход дутья;
  - вид решаемой технологической задачи:
    - расчет требуемой рудной нагрузки;
    - расчет требуемой температуры дутья;
    - расчет требуемой влажности дутья;
    - расчет содержания кремния в чугуна.

Формирование набора задаваемых данных о параметрах процесса (*проектный период*) осуществляется пользователем приложения в диалоговом режиме в процессе корректировки данных в таблицах с параметрами работы печи в текущий период. Для добавления и удаления материалов из списков шихтовых материалов на экранной форме рядом со списком предусмотрены кнопки «+» и «-» соответственно. Добавление материалов осуществляется из справочников, что позволяет автоматически заполнять химические составы материалов по данным последнего химического анализа. Кнопки «>>» позволяют выводить на экран полный или краткий химический состав материала. При решении любой из технологических задач, перечисленных выше, пользователь должен

- 1) во-первых, определить:

- состав шихтовых материалов;
  - параметры комбинированного дутья;
  - параметры продуктов плавки (содержание кремния в чугуне и основность шлака). В проектный период значения содержания кремния в чугуне и основности шлака вводятся на основе текущей оценки с учетом требуемого изменения параметра. Отклонения этих параметров от текущих значений не должны превышать значений, установленных в настройках программы. Если содержание кремния в чугуне не введено (равно нулю), то в расчетах оно принимается равным значению в текущий период;
  - количество работающих фурм в текущий и проектный периоды. По умолчанию установлено максимальное количество фурм для данной печи. В случае неработающих фурм необходимо ввести количество фактически работающих фурм;
- 2) задать условия расчета:

- шлакового режима. Если значение основности шлака в проектный период равно нулю, то расчет основности шлака выполняется при заданных пользователем флюсах. При заданной основности шлака в проектный период выполняется расчет требуемого количества флюсов. Пользователю необходимо указать вид флюсующего материала, выбрав его из выпадающего списка. Если в результате расчетов будет показано, что требуемой основности шлака при заданных параметрах шихты получить нельзя, необходимо выбрать другой флюсующий материал;
  - производительности печи. По умолчанию выполняется расчет производительности печи при условии постоянного минутного расхода дутья. Для расчета требуемого расхода дутья при условии заданной производительности печи необходимо отметить «Расчет на заданное количество подач» и указать количество подач в смену;
- 3) выбрать в зависимости от решаемой технологической задачи рассчитываемый параметр: рудная нагрузка, температура дутья, влажность дутья или содержание кремния в чугуне из выпадающего списка;
- 4) нажать кнопку «Расчет».

Пример проектного расчета рудной нагрузки при изменении состава железорудной части шихты приведен на рис. 2.48.

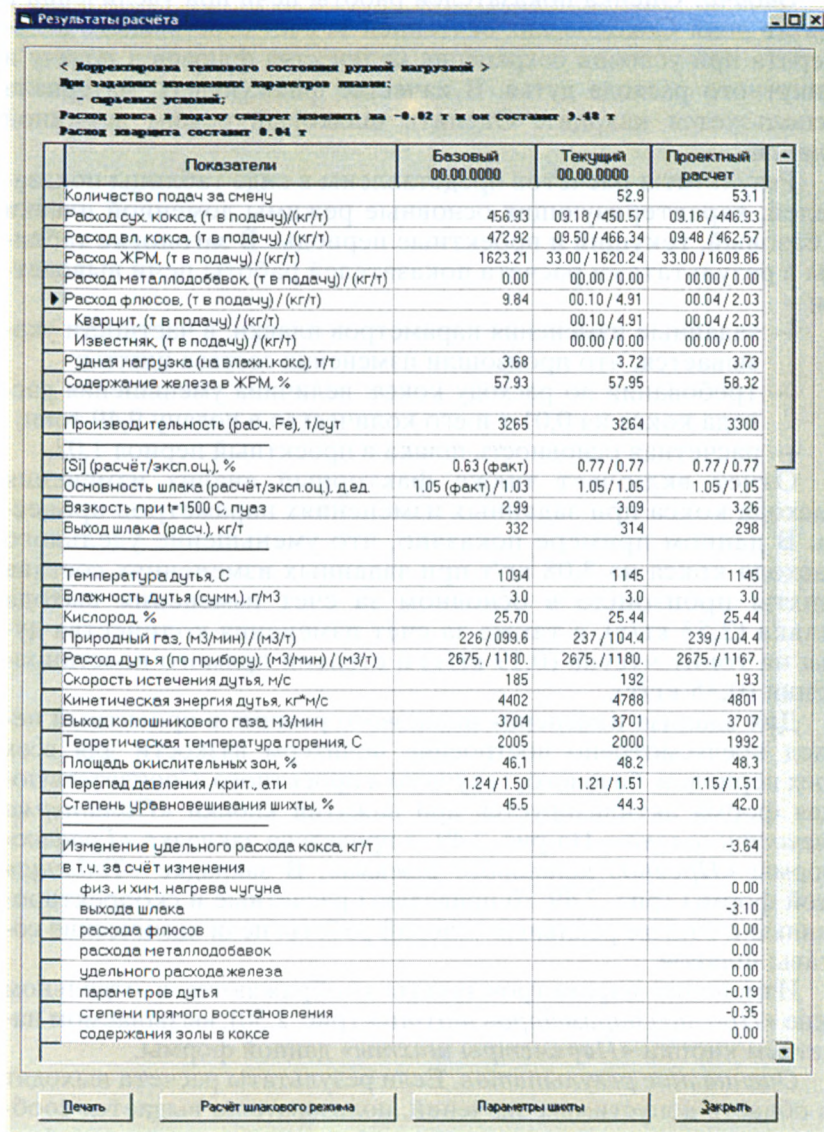


Рис. 2.48. Форма «Результаты расчета»

**Задача:** Оценка показателей работы печи при увеличении в шихте доли Соколовских окатышей за счет собственного агломерата при условии сохранения количества флюсов в подачу и минутного расхода дутья. В качестве флюсующего материала используется кварцит. Оценить шлаковый режим доменной плавки.

Результаты расчетов представлены в виде таблицы показателей, характеризующих основные режимы доменной плавки в базовый, текущий и проектные периоды. В заголовке таблицы с результатами расчета показателей работы печи выводятся:

- заданные изменения параметров плавки, в частности указывается, что произошли изменения состава шихты;
- требования по расходу кокса: величина уменьшения расхода кокса на 0,01 т и его количество в подачу 9,49 тонн;
- расчетная основность шлака в проектный период 1,02.

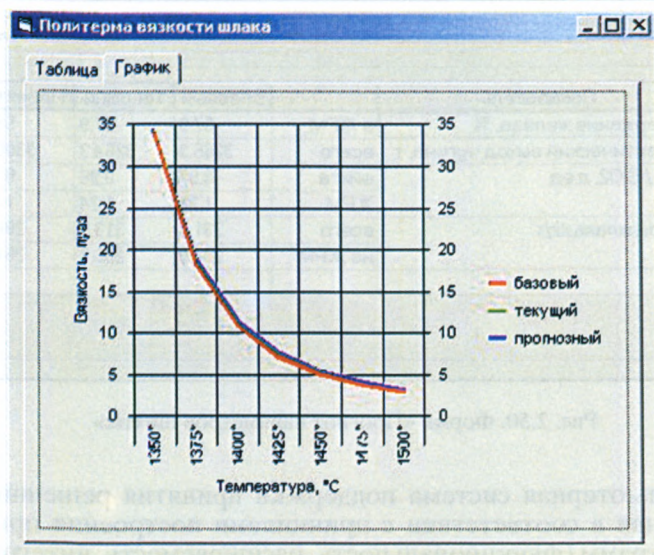
Отчет включает также факторный анализ изменения расхода кокса при заданных изменениях параметров процесса. В данном примере показано, что уменьшение удельного расхода кокса на 3,08 кг/т при заданных изменениях состава шихты произошло в основном за счет изменения выхода шлака (2,53 кг/т), а также за счет изменения количества дутья на тонну чугуна (0,19 кг/т) и степени прямого восстановления (0,35 кг/т).

Для анализа изменения шлакового режима в проектный период предусмотрено построение политерм вязкости для всех трех периодов: базового, текущего и проектного. Соответствующая форма активизируется при нажатии кнопки *«Политерм вязкости шлака»*. На рис. 2.49, а приведена закладка *«График»* формы *«Прогноз шлакового режима»*. В закладке *«Таблица»* этой формы (рис. 2.49, б) приведены расчетные и скорректированные с учетом реальных условий работы печи химические составы шлаков.

Изменения параметров шихты отображаются в отдельном окне *«Прогноз параметров шихты»* (рис. 2.50), вызываемом нажатием кнопки *«Параметры шихты»* данной формы.

**Оценивание результатов.** Если результаты расчета выходят за область допустимых значений, пользователю выдается сообщение о невозможности реализации заданного режима и необходимости ввода пользователем корректных значений параметров процесса.

а



б

Политерма вязкости шлака

Таблица | График

скорректированный		расчётный				
Хим. состав шлака						
Период	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Осн.	градиент вязк.
базовый (расч.)	39.85	38.78	10.45	7.43	1.03	0.28
текущий	40.07	38.31	10.77	7.96	1.05	0.27
прогнозный	39.72	37.96	11.23	8.05	1.05	0.26

Политерма вязкости (по скорректированному составу шлака), пуаз							
Период	1350	1375	1400	1425	1450	1475	1500
базовый	33.82	18.13	10.86	7.12	5.03	3.78	2.99
текущий	34.05	18.48	11.15	7.34	5.20	3.91	3.09
проектный	34.15	18.96	11.61	7.72	5.49	4.13	3.26

Закрывать

Рис. 2.49. Форма «Прогноз шлакового режима»:  
а — график, б — таблица



Параметры шихты				
Показатель		Базовый	Текущий	Проектн
► Содержание железа, %	в ЖРМ	57.9	57.9	58.3
Теоретический выход чугуна, т	всего	3265.3	3264.3	3300.1
CaO / SiO <sub>2</sub> , д.ед.	шихта	0.97	0.96	0.95
	ЖРМ	1.28	1.24	1.17
Выход шлака, кг/т	всего	331.9	313.5	298.0
	из ЖРМ	274.9	266.7	254.3

Рис. 2.50. Форма «Прогноз параметров шихты»

Компьютерная система поддержки принятия решений, разработанная в соответствии с принципами построения прикладных программ (функциональность, расширяемость, интеграция с базами данных, понятный интерфейс, безопасность, оценивание информации), отражая состояние процесса и реализуя проектные расчеты показателей работы доменной печи в реальном времени, позволяет решать оперативные задачи управления технологией доменной плавки.

## Глава 3

# АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО УПРАВЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЕЙ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

### 3.1. Материальные и тепловые балансы доменной плавки

#### *Материальный баланс доменной плавки*

Материальный баланс учитывает приход и расход всех материалов и продуктов доменной плавки.

Расчет материального баланса по фактическим данным работы доменной печи встречается серьезные трудности, связанные с рядом обстоятельств: неточные химические составы шихтовых материалов и продуктов плавки, погрешности в регистрации расхода дутья, его состава, а также состава колошникового газа, погрешности взвешивания компонентов шихты, массы полученного чугуна и шлака.

Если известны расходы шихтовых материалов и полученных продуктов плавки — чугуна, шлака, колошникового газа, пыли и шлама, то сведение материального баланса не представляет особой сложности. При известном расходе кокса, рудных материалов и флюса, их составов необходимо расчетное определение количества дутья, выхода колошникового газа, а также удельного выхода шлака. Необходим также расчет степени прямого восстановления оксидов железа, а также степени использования монооксида углерода и водорода в печи, поскольку эти параметры определяют состав, а следовательно, и массу выходящего из печи колошникового газа.

Хорошая сходимость материального баланса доменной плавки свидетельствует о достоверности регистрируемых параметров плавки, точности проведенных химических анализов шихтовых материалов, продуктов плавки и колошникового газа, о правильном учете поступающих в цех материальных ресурсов доменного передела.

Поскольку кроме загрузки шихтовых материалов в печь подается дутье, а среди продуктов плавки кроме чугуна и шлака имеется и отходящий из печи колошниковый газ, то материальному балансу предшествует расчет количества дутья и колошникового газа.

Расход дутья определяется по количеству сжигаемого у фурм углерода кокса и газифицируемых углеводородных добавок.

Выход и состав колошникового газа может быть рассчитан по балансу азота либо определен суммированием расчетных расходов компонентов выходящего из печи газа:  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{CH}_4$ . В последнем случае появляется возможность графического отображения картины изменения состава и количества газа по высоте доменной печи (рис. 3.1).

Перед составлением баланса необходимо выразить удельные расходы дутья и колошникового газа, полученные в объемном выражении в массовых расходах. Необходимо также учесть массу паров воды, образующихся в результате восстановления оксидов железа водородом ( $\text{FeO} + \text{H}_2 = \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$ ).

На рис. 3.2 приведен пример составления материального баланса доменной плавки для доменной печи № 1 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

При достаточно хорошей постановке вопросов регистрации масс загружаемых в доменную печь шихтовых материалов, учета выноса колошниковой пыли и шламов газоочистки, регистрации расходов дутья, природного газа, при качественном проведении химических анализов материалов и газов невязка материального баланса плавки по производственным данным составляет 1,5—2,5 %.

### *Тепловой баланс доменной плавки*

Для реализации доменного процесса необходимо тепло. Оно расходуется на нагрев загруженных в доменную печь шихтовых материалов, плавления чугуна и шлака, оно необходимо для компенсации отрицательных тепловых эффектов восстановления оксидов железа и других элементов, для увеличения скорости течения химических реакций, сопровождающих доменный передел, для разложения гидратных и карбонатных соединений, для испарения влаги шихты и т. д.

Результат тепловой работы доменной печи наглядно отражает тепловой баланс плавки. Этот баланс дает общую картину как приходной, так и расходной частей баланса, что позволяет выполнить обоснованный анализ тепловой работы печи и сделать конкретные выводы о возможности сокращения удельного расхода кокса при доменной плавке.

Тепловой баланс доменной плавки выполняется на основе составленного материального баланса; он составляется на 1 кг чугуна и для наглядности отображается в табличном виде.



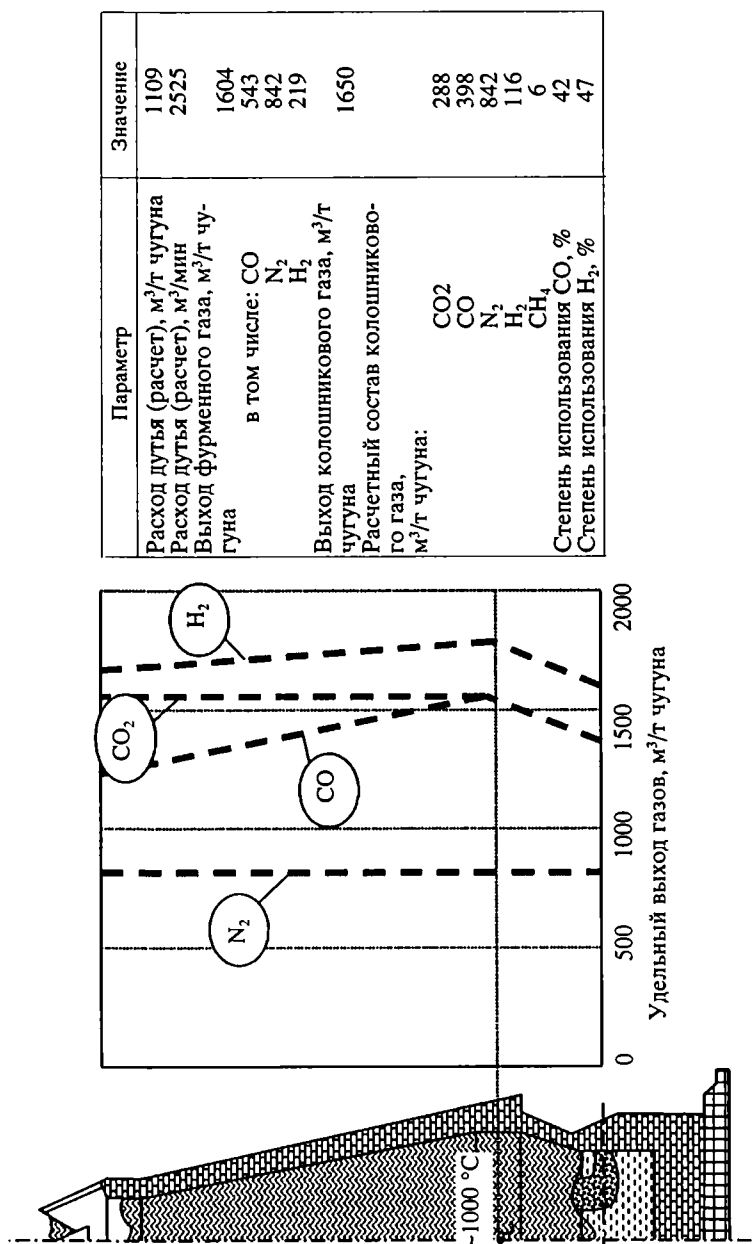


Рис. 3.1.1. Изменение количества и состава газа по высоте доменной печи (д.п. № 1 ОАО ММК 17.01.04)

Балансы доменной плавки (демонстрационная версия)

Исходные данные: **Материальный баланс** | Тепловой баланс | Анализ мероприятий | О программе

Таблица материального баланса

№ п/п	Приход	кг/т чугуна	№ п/п	Расход	кг/т чугуна
1.	Рудный материал	1716,	1.	Чугун	1000,
2.	Кокс	420,	2.	Шлак	260,
3.	Металлодобавки	.	3.	Колошниковый газ	2131,6
4.	Окатыши	.	4.	Масса влаги от восстановления оксидов железа водородом	83,
5.	Известняк	.	5.	Колошниковая пыль	23,
6.	Природный газ	75,	6.	Шлак	24,
7.	Дутье	1429,9	7.	Потери чугуна со шлаком и окислом (0,5%)	50,
				Итого расход	3571,5
				Невязка баланса	69,4
	ИТОГО	3640,9		ИТОГО	3640,9

Расчет | Вывод

Рис. 3.2. Материальный баланс доменной плавки на печи № 1 ОАО ММК.

$$\text{Невязка материального баланса} = \frac{69,4}{3640,9} \cdot 100 = 1,9 \%$$

**Приходная часть теплового баланса включает в себя следующие статьи**

- *Количество тепла, получающегося при горении углерода кокса, определяется из уравнения*

$$Q_{\Gamma} = C_{\Phi} \cdot 9800 \cdot 10^{-3}, \quad (3.1)$$

где  $C_{\Phi}$  — количество углерода кокса, сжигаемого у фурм, кг/т чугуна.

- *Приход тепла с нагретым дутьем:*

$$Q_{\text{н.д}} = 0,001V_{\text{д}} \left\{ \left[ 0,01\omega C_{\text{O}_2} + (1 - 0,01\omega) C_{\text{N}_2} \right] \times \right. \\ \left. \times (1 - 0,00124f) + 0,00124f C_{\text{H}_2\text{O}} \right\} \cdot t_{\text{д}}, \quad (3.2)$$

- где  $V_d$  — расход дутья, м<sup>3</sup>/т чугуна;  
 $\omega$  — содержание кислорода в дутье, %;  
 $C_{O_2}, C_{N_2}, C_{H_2O}$  — теплоемкости газов и паров воды, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  
 $f$  — влажность дутья, г/м<sup>3</sup>;  
 $t_d$  — температура горячего дутья, °С.  
 • *Количество тепла, выделяющегося при конверсии (неполном горении) природного газа* (при условии, что природный газ — это метан):

$$Q_{\text{кон.п.г}} = 0,001 \cdot V_{\text{п.г}} \cdot 1657, \quad (3.3)$$

- где  $V_{\text{п.г}}$  — расход природного газа, м<sup>3</sup>/т чугуна.  
 • *Количество тепла, выделяющегося при процессе шлакообразования.* Эта статья прихода тепла в печь учитывается только в случае загрузки в печь «сырого» известняка, поскольку если используется окучкованное рудное сырье, то процессы минералообразования с соответствующими тепловыми эффектами проходят на агломерационной либо обжиговой машине, а не в доменной печи. Эта статья прихода тепла определяется из уравнения

$$Q_{\text{шл.обж}} = 1128 \cdot 10^{-5} \cdot G_{\text{и}} \cdot (\text{пмп})_{\text{и}}, \quad (3.4)$$

- где  $G_{\text{и}}$  — удельный расход загружаемого в печь известняка, кг/т чугуна;  
 $(\text{пмп})_{\text{и}}$  — потери массы при прокаливании известняка, мас. %.

- В случае загрузки в печь горячего агломерата необходимо учитывать еще одну статью прихода тепла — *физическое тепло шихты*. Эта статья рассчитывается следующим образом:

$$Q_{\text{н.жрм}} = 0,001 G_{\text{жрм}} C_{\text{жрм}} t_{\text{жрм}}, \quad (3.5)$$

- где  $G_{\text{жрм}}$  — удельный расход «горячего» агломерата, кг/т чугуна;

$C_{\text{жрм}}$  — теплоемкость «горячего» агломерата, кДж/(кг·К);

$t_{\text{жрм}}$  — температура «горячего» агломерата, °С.

Эта статья прихода тепла имеет место только при загрузке в печь горячего агломерата, температура которого при его загрузке в печь составляет 400—600 °С, а теплоемкость агломерата при этой температуре можно принимать равной 0,95 кДж/(кг·К).

**Расходная часть теплового баланса включает следующие статьи**

- *Расход тепла на прямое восстановление оксидов железа определяется из уравнения*

$$Q_{\text{пр}}^{\text{Fe}} = 0,01[\text{Fe}]r_d 2716, \quad (3.6)$$

где  $r_d$  — степень прямого восстановления, доли ед.

- *Расход тепла на прямое восстановление примесей чугуна:*

$$Q_{\text{пр}}^{\text{пр}} = 0,01 \cdot (5220 \cdot [\text{Mn}] + 22600 \cdot [\text{Si}] + \\ + 15490 \cdot [\text{P}] + 36167 \cdot [\text{Ti}] + 7982 \cdot [\text{V}]), \quad (3.7)$$

где  $[\text{Mn}]$ ,  $[\text{Si}]$ ,  $[\text{P}]$ ,  $[\text{Ti}]$ ,  $[\text{V}]$  — содержание элементов в чугуне, %.

- *Затраты тепла на процесс десульфурации чугуна:*

$$Q_s = 1734 \cdot 10^{-5} U_{\text{шл}}(S), \quad (3.8)$$

где  $U_{\text{шл}}$  — удельный выход шлака, кг/т чугуна;

$(S)$  — содержание серы в шлаке, %.

- *Затраты тепла на компенсацию отрицательного теплового эффекта восстановления оксидов железа водородом:*

$$Q_{\text{В}}^{\text{H}_2} = 1731 \cdot 10^{-3} [0,00124 f V_{\text{д}} + 2 V_{\text{п.г}}] \eta_{\text{H}_2}, \quad (3.9)$$

где  $\eta_{\text{H}_2}$  — степень использования водорода в печи.

- *Количество тепла, уносимого из печи жидким чугуном:*

$$Q_{\text{ч}} = 1 C_{\text{ч}} t_{\text{ч}}, \quad (3.10)$$

где  $C_{\text{ч}}$  — теплоемкость жидкого чугуна, кДж/(кг·К) (принимается 0,9 кДж/(кг·К);

$t_{\text{ч}}$  — температура чугуна, °С.

- *Количество тепла, уносимого из печи жидким шлаком:*

$$Q_{\text{шл}} = 0,001 U_{\text{шл}} C_{\text{шл}} (t_{\text{ч}} + 50), \quad (3.11)$$

где  $C_{\text{шл}}$  — теплоемкость жидкого шлака, кДж/(кг·К) (принимается 1,26 кДж/(кг·К).

- *Расход тепла на разложение влаги дутья:*

$$Q_{\text{вл}} = 1,24 \cdot 10^{-5} V_{\text{д}} f 6912. \quad (3.12)$$

- *Расход тепла на разложение известняка:*

$$Q_{\text{и}} = 4042 \cdot 10^{-5} G_{\text{и}}(\text{импп})_{\text{и}}, \quad (3.13)$$

$G_{\text{и}}$  — расход известняка, кг/т чугуна;  
 $(\text{импп})_{\text{и}}$  — потери массы при прокаливании известняка, %.

- *Расход тепла на испарение влаги шихты* в общем случае определяется следующим образом:

$$Q_{\text{вп.ш}} = 2452 \cdot 10^{-5} (G_{\text{жрм}} f_{\text{жрм}} + G_{\text{и}} f_{\text{и}} + k f_{\text{к}}), \quad (3.14)$$

где  $G_{\text{жрм}}$ ,  $G_{\text{и}}$ ,  $k$  — удельные расходы рудных материалов, известняка и кокса, кг/т;

$f_{\text{жрм}}$ ,  $f_{\text{и}}$ ,  $f_{\text{к}}$  — содержание влаги в материалах, мас. %.

- *Количество тепла, уносимого из печи колошниковым газом*, определяется из уравнения

$$Q_{\text{кг}} = 10^{-5} \left\{ \left[ \text{CO}_2^{\text{кг}} C_{\text{CO}_2} + (\text{CO}^{\text{кг}} + \text{N}_2^{\text{кг}}) C_{\text{N}_2} + \text{H}_2^{\text{кг}} C_{\text{H}_2} \right] V_{\text{кг}} + \right. \\ \left. + \left[ G_{\text{жрм}} f_{\text{жрм}} + G_{\text{и}} f_{\text{и}} + k f_{\text{к}} + \frac{V_{\text{кг}} \text{H}_2^{\text{кг}} \eta_{\text{H}_2}}{(1 - \eta_{\text{H}_2})} \right] C_{\text{H}_2\text{O}} \right\} t_{\text{кг}}, \quad (3.15)$$

где  $C_{\text{CO}_2}$ ,  $C_{\text{CO}}$ ,  $C_{\text{N}_2}$ ,  $C_{\text{H}_2\text{O}}$  — теплоемкости соответствующих газов при температуре колошникового газа, кДж/(м<sup>3</sup>·К).

- *Тепловые потери печи* с охлаждающей водой и в окружающее пространство находятся по разности между суммой прихода тепла в печь ( $Q_{\text{приход}}$ ) и суммарным значением найденных выше статей расхода ( $Q_{\Sigma}$ ):

$$Q_{\text{потерь}} = Q_{\text{приход}} - Q_{\Sigma}. \quad (3.16)$$

Следует отметить, что тепловые потери печи при работе доменных печей с достаточно сохранившейся огнеупорной кладкой, с исправной системой охлаждения в нормальном режиме работы при выплавке передельных чугунов составляют 10—15 %. Тепловые потери печи зависят также и от производительности доменной печи; при работе печи в режиме «тихого хода» с

уменьшенным расходом дутья тепловые потери печи возрастают, что сопровождается ростом удельного расхода кокса.

Результаты расчета теплового баланса сводятся в таблицу. На рис. 3.3 приведен пример составления теплового баланса для доменной плавки на печи № 1 ОАО ММК.

### *Программное обеспечение системы*

Для автоматического выполнения вышеприведенных расчетов разработан пакет «Расчет материального и теплового балансов доменной плавки». Функциональные возможности пакета позволяют:

- производить настройку исходных данных на реальные показатели доменного процесса;
- составлять материальный и тепловой балансы для конкретного варианта исходных данных;
- прогнозировать влияние различных мероприятий на удельные показатели расхода кокса и экономии тепла в конкретных технологических условиях. В частности, возможен расчет показателей при следующих мероприятиях:
  - снижение степени прямого восстановления на 0,01;
  - увеличение температуры дутья на 10 °С;
  - снижение содержания кремния в чугуна на 0,1 %;
  - снижение выхода шлака на 10 кг/т чугуна;
  - снижение расхода известняка на 10 кг/т чугуна;
  - снижение влажности дутья на 1 г/м<sup>3</sup>;
  - снижение тепловых потерь на 1 %;
  - увеличение расхода природного газа на 10 м<sup>3</sup>/т чугуна.

### *Условия выполнения программы*

Для выполнения программы требуется наличие операционной системы Microsoft Windows 98/ME/NT/2000/XP.

### *Выполнение программы*

После запуска программы на экране появляется диалоговое окно, на котором присутствуют следующие закладки:

- «Исходные данные»;
- «Материальный баланс»;
- «Тепловой баланс»;
- «Анализ мероприятий»;
- «О программе».

**Балансы доменной плавки (демонстрационная версия)**

Исходные данные | Материальный баланс | Тепловой баланс | Анализ мероприятий | 0 программ

Таблица теплового баланса

N п/п	Статья прихода тепла	кДж/кг	z	N п/п	Статья расхода тепла	кДж/кг	z
1.	Тепло от горения кокса	2301,4	53,72	1.	Затраты тепла на прямое восстановление оксидов железа	893,6	20,86
2.	Тепло, вносимое горячим дутьем	1808,6	42,22	2.	Затраты тепла на прямое восстановление принесшей чугуна	161	3,76
3.	Тепло конверсии природного газа	174	4,06	3.	Затраты тепла на десульфирование чугуна	4,6	,11
4.	Теплота от шлакообразования	-	-	4.	Затраты тепла восстановление оксидов железа водородом	178	4,16
5.	Физическое тепло шихты	-	-	5.	Количество тепла, уносимое чугуном	1264,5	29,52
				6.	Количество тепла, уносимое шлаком	476,7	11,13
				7.	Количество тепла на разложение влаги дутья	60,5	1,41
				8.	Количество тепла, необходимое на разложение известняка	-	-
				9.	Количество тепла, пошедшее на испарение влаги	43,3	1,01
				10.	Количество тепла, уносимое колосниковым газом	896,7	20,98
				11.	Тепловые потери печи	303,1	7,08
ИТОГО		4284	100	ИТОГО		4284	100

Расчет

Выход

Рис. 3.3. Тепловой баланс доменной плавки на печи № 1 ОАО «Магнитогорской металлургический комбинат»

Таблица 3.1

## Исходные данные для расчета

Категория	Параметр
1	2
<i>Характеристики сырья</i>	
Железорудные материалы	Удельный расход рудного материала, кг/т чугуна Удельный расход металлодобавок, кг/т чугуна Удельный расход «горячего» агломерата, кг/т чугуна Содержание влаги в ЖРМ, мас. % Теплоемкость «горячего» агломерата, кДж/(кг·К) Температура «горячего» агломерата, °С
Кокс	Удельный расход кокса, кг/т чугуна Зола кокса ( <i>A</i> ), % Сера кокса ( <i>S</i> ), % Летучие кокса ( <i>L</i> ), % Влага кокса ( <i>W</i> ), %
Известняк	Удельный расход известняка, кг/т чугуна Содержание влаги в известняке, мас. % Потери массы при прокаливании в известняке, % масс.
<i>Режимные параметры</i>	
	Степень прямого восстановления ( $r_d$ ) Суточная производительность доменной печи, т/сут
<i>Параметры дутья</i>	
	Минутный расход дутья (по показаниям КИП), м³/мин Температура дутья, °С Влажность дутья, г/м³ Содержание кислорода в дутье, % Расход природного газа, м³/т чугуна
<i>Продукты плавки</i>	
Чугун	Содержание кремния в чугуне, [Si], мас. % Содержание марганца в чугуне, [Mn], мас. % Содержание серы в чугуне, [S], мас. %



Продолжение таблицы 3.1

1	2
	Содержание фосфора в чугуна, [P], мас. % Содержание титана в чугуна, [Ti], мас. % Содержание хрома в чугуна, [Cr], мас. % Содержание ванадия в чугуна, [V], мас. % Содержание углерода в чугуна, [C], мас. % Температура чугуна, °С Теплоемкость чугуна, кДж/(кг·К)
Шлак	Удельный выход шлака, кг/т чугуна Содержание серы в шлаке (S), % Теплоемкость шлака, кДж/(кг·К)
Колошниковый газ	Температура колошникового газа, °С Содержание CO <sub>2</sub> в колошниковом газе, % Содержание CO в колошниковом газе, % Содержание H <sub>2</sub> в колошниковом газе, %

Работа пользователя с программой начинается с просмотра и возможной корректировки исходных данных. В табл. 3.1 приведен перечень исходных данных, которые используются в процессе расчета. Все исходные данные разбиты на группы по функциональной принадлежности.

Внешний вид диалогового окна представлен на рис. 3.4. Пользователь с помощью указателя мыши выбирает необходимую группу параметров, и в правой части окна появляется их перечень. Корректировка осуществляется с помощью кнопки «Изменить...» или двойным щелчком мыши на выделенном показателе. Для удобства все показатели снабжены всплывающими подсказками. После окончания корректировки необходимо запустить процедуру расчета, нажав кнопку «Расчет».

### Результаты расчета

Результаты отображаются на соответствующих вкладках. В частности, вид окна с результатами расчета материального баланса показан на рис. 3.2, теплового баланса — на рис. 3.3. Просмотр результатов расчета по влиянию различных мероприятий на удельные показатели расхода кокса и экономии тепла для выбранного варианта исходных данных осуществляется на вкладке «Анализ мероприятий» (рис. 3.5).

Для завершения работы программы необходимо нажать кнопку «Выход».

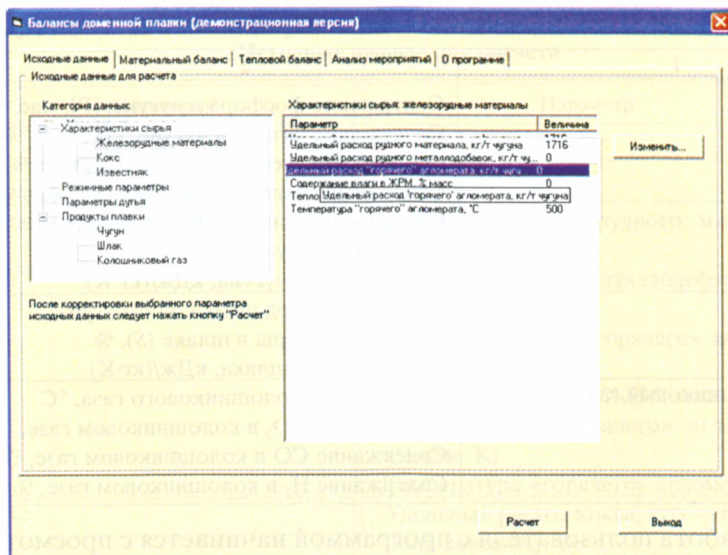


Рис. 3.4. Окно просмотра и корректировки исходных данных

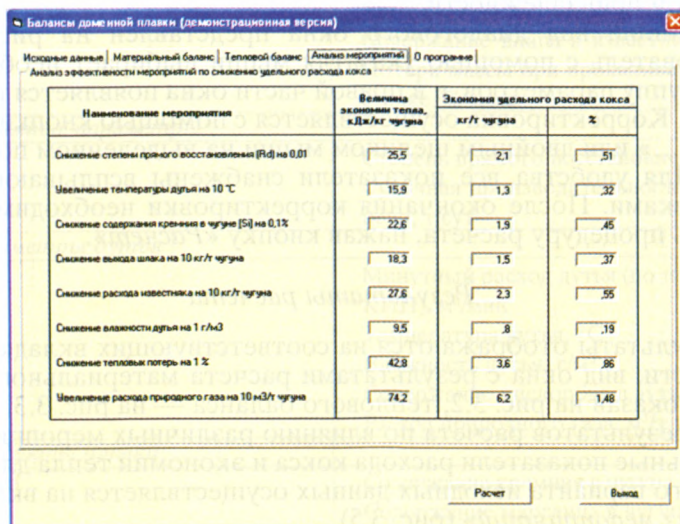


Рис. 3.5. Просмотр вкладки «Анализ мероприятий»

### 3.2. Выбор оптимального состава железорудной части агломерационной и доменной шихт

В настоящее время доменные цехи крупнейших металлургических предприятиях работают как на привозном, так и местном железорудном сырье. При этом расходы и химические составы привозных окатышей, как правило, не поддаются управлению, а их базовые расходы определяются планированием поставок. В связи с этим управление свойствами железорудной части доменной шихты осуществляется подбором оптимального состава агломерата (окатышей) местных фабрик.

В связи с этим возникает проблема выбора поставщика железорудного сырья, а также определения оптимального состава местного агломерата. Требуется определить оптимальный состав местного агломерата при известном составе и расходах привозного железорудного сырья.

Так, доменный цех ОАО ММК работает на железорудных материалах, получаемых спеканием агломерационных руд и концентратов на местных аглофабриках, а также на привозных окатышах Соколовско-Сарбайского ГОКа. В небольших количествах используются окатыши Качканарского, Лебединского, Михайловского и других ГОКов. В ряде случаев в шихту вводятся железные руды гор Магнитная и Михайловские. Основными рудными материалами являются агломераты, получаемые на аглофабриках № 2, 3 и 4, а также Соколовские окатыши. При определенном соотношении этих материалов получают шлаки, имеющие повышенную вязкость и низкую серопоглотительную способность.

Соколовские окатыши характеризуются пониженным значением так называемого «кремниевого» модуля — отношения содержания кремнезема к глинозему в пустой породе железорудных окатышей ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Кремниевый модуль является показателем содержания глинозема в конечном доменном шлаке. В том случае, когда значение кремниевого модуля  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3-4$  и более, содержание глинозема в шлаке находится в пределах 10—12 %, наиболее благоприятных для осуществления доменной плавки. При снижении этого показателя до двух содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в шлаке достигает 17 %, что не отвечает нормальному течению шлакового режима плавки. При значении  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 1$  доменная плавка без ввода разжижающих добавок вообще невозможна.

Таблица 3.2

**Значения кремниевого модуля ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) для железорудных материалов, проплавляемых в доменном цехе ОАО ММК**

Железорудный материал	Значение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
Агломерат аглофабрики № 2	3,36
Агломерат аглофабрики № 3	3,36
Агломерат аглофабрики № 4	3,38
Соколовские окатыши	3,06
Качканарские окатыши	15,3
Лебединские окатыши	20,5
Михайловские окатыши	52,8

В табл. 3.2 приведены значения кремниевого модуля используемых в доменном цехе ОАО ММК железорудных материалов (по данным среднемесечного анализа за март 2003 г.).

Как видно из табл. 3.2, Соколовские окатыши характеризуются наименьшим значением кремниевого модуля, и повышение их доли в шихте будет сопровождаться возрастанием содержания глинозема в шлаке, возрастанием вязкости шлака и ухудшением процесса десульфурации чугуна. В этом случае снижение вязкости шлака и увеличение его серопоглотительной способности возможно за счет двух факторов: либо снижения доли Соколовских окатышей в шихте, либо изменения основности шлака.

В связи с этим актуальным является решение задачи определения оптимального состава местного агломерата (агломерационной шихты) и доменной шихты с учетом особенностей шлакового режима доменной плавки, т. е. следует выполнить расчет состава агломерата для получения заданных свойств шлака при выборе соотношения привозного железорудного сырья и собственного агломерата, производимого на аглофабриках ОАО ММК.

Модель и разработанный на ее основе пакет прикладных программ позволяют производить расчеты, связанные как с определением объема производимого агломерата на аглофабриках ОАО ММК, так и состава этого агломерата исходя из характеристик имеющихся привозных железорудных материалов при условии получения надлежащих свойств шлака (вязкости, температуры плавления, обессеривающей способности) [133, 141, 148].

Физическая постановка задачи заключается в следующем.

Требуется определить состав и расходы компонентов доменной шихты (агломерационной шихты), обеспечивающие рациональную производительность, расход кокса, свойства шлака.

Рациональный режим плавки обеспечивается корректировкой:

- состава железорудной части агломерационной шихты;
- расхода флюсов (известняка, доломита) в агломерационную шихту;
- расхода одного из флюса (известняка, кварцита и т. п.) в доменную шихту;
- соотношения компонентов железорудной части доменной шихты;
- возможна любая комбинация указанных вариантов.

В основе решения задачи положены модели:

- сквозного расчета агломерационной и доменной шихт;
- расчета технико-экономических показателей доменной плавки (расхода кокса, производительности);
- определения свойств шлака, его обескислороживающей способности и прогнозирования содержания серы в чугуне.

Моделирование шлакового режима в идеологическом плане не отличается от алгоритма, описанного в параграфе 2.4.

Блок-схема структуры модели представлена на рис. 3.6, из которого следует, что последовательность моделирования заключается в следующем.

### *1. Выбирается базовый период работы печи*

Информация о базовом периоде необходима для адаптации математической модели к реальным условиям работы печи. Условия работы печи в данный период должны характеризоваться стабильностью и быть по возможности близкими к проектному периоду по конструктивным и режимным параметрам.

Исходными данными для базового периода являются:

- химические составы и расходы (кг/т чугуна) всех компонентов доменной шихты;
- параметры комбинированного дутья (расход природного газа, м<sup>3</sup>/т чугуна; температура горячего дутья, °С; влажность дутья, г/м<sup>3</sup>; содержание кислорода в дутье, %; давление горячего дутья, атм);
- состав и давление колошниковых газов;

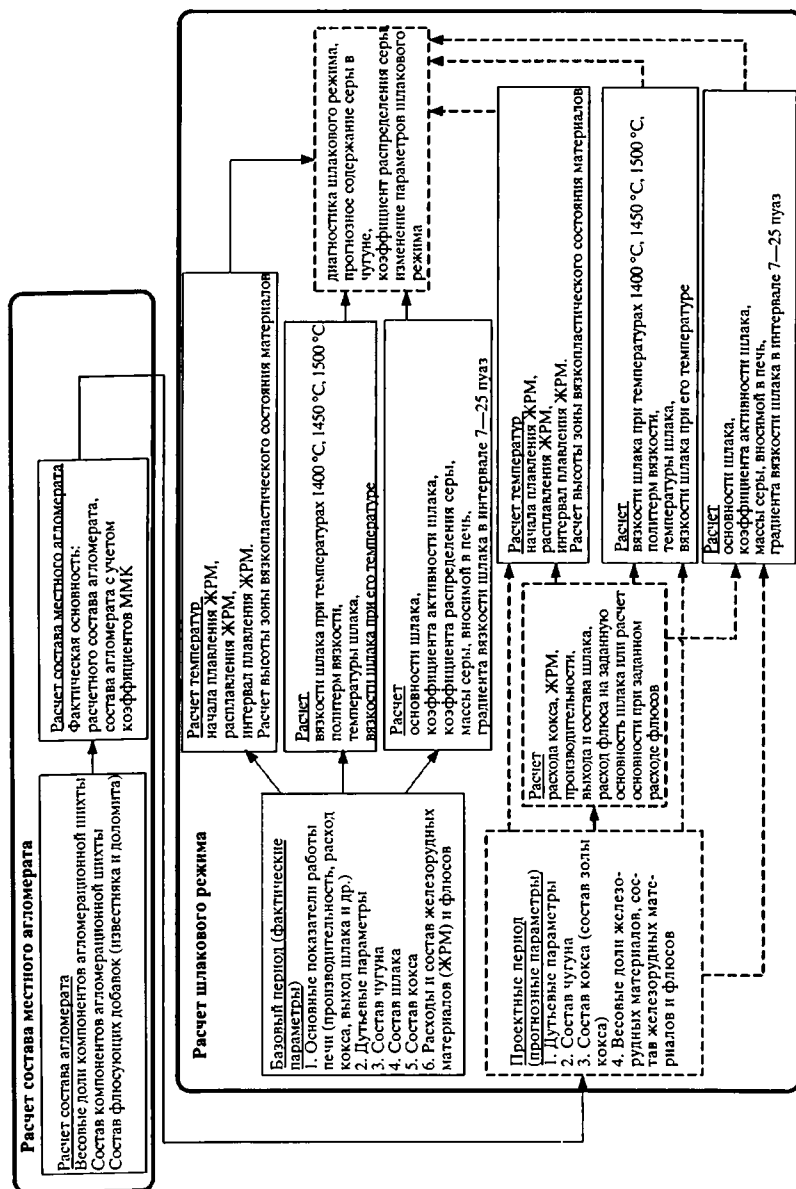


Рис. 3.6. Блок-схема структуры модели выбора состава доменной и агломерационной шихт

• продукты плавки: состав шлака и чугуна, температура чугуна.  
По фактическим показателям работы печи в базовом периоде рассчитываются параметры, определяющие десульфурацию чугуна (см. параграф 2.4):

- основности шлака  $\text{CaO/SiO}_2$ ,  $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$ ,  $(\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ , обобщенная основность шлака по И.С. Куликову;
- температура шлака;
- вязкость шлака при температурах 1400 °С, 1500 °С и при температуре шлака;
- активность серы в чугуне;
- парциальное давление монооксида углерода в горновом газе;
- выход шлака (по балансу оксида кальция, балансу шлакообразующих элементов и т. п.), кг/т чугуна;
- масса серы, вносимая в печь, кг/т чугуна;
- градиент вязкости, численно равный уменьшению вязкости шлака при увеличении температуры шлака на 1 °С в диапа-

зоне вязкости шлака от 25 пуаз до 7 пуаз:  $\Delta\eta_{\eta}^{25}/\Delta t = \frac{25 - 7}{t_{\text{шл}} - t_{\text{шл}}^{25}}$ ,

пуаз/°С;

- коэффициент распределения серы (по фактическим данным).

## *2. Выбирается проектный период работы печи*

Проектный период — период работы печи, для условий которого осуществляется моделирование. При решении задач прямого расчета шлакового режима и состава агломерационной шихты пользователем вводятся планируемые:

- виды, химические составы привозных железорудных материалов в доменной шихте, а также флюсов при целесообразности их ввода в доменную шихту;
- технический состав кокса и его золы;
- параметры комбинированного дутья (расход природного газа, м<sup>3</sup>/т чугуна; температура горячего дутья, °С; влажность дутья, г/м<sup>3</sup>; содержание кислорода в дутье, %; давление горячего дутья, ати);
- состав чугуна (содержание кремния и т. д.) за исключением содержания серы и титана в чугуне, определяемых расчетом, %;
- вынос и состав колошниковой пыли.

Предусматривается несколько вариантов моделирования этого периода.

### *2.1. Прямой расчет свойств доменного шлака при известных расходах и составах всех загружаемых в доменную печь материалов (Проект 1)*

Предполагается, что дополнительно задан состав местного агломерата, весовые доли всех компонентов железорудной части и расходы флюсов доменной шихты.

Алгоритм расчета сводится к следующему:

- по заданным весовым долям железорудных рудных компонентов шихты находится средневзвешенный состав рудного материала;
- по балансу железа рассчитывается удельный расход средневзвешенного рудного материала без учета (и с учетом) выноса пыли, уноса материалов со шлаком, потерь чугуна со скрапом и шлаком без учета (и с учетом) золы кокса, кг/т чугуна;
- на основе проектных параметров определяются удельный расход кокса и прогнозная производительность доменной печи. Удельный расход кокса и производительность печи для проектного периода определяются по соотношениям

$$K^n = K^6 - \sum_{i=1}^{i=n} a_i (X_i^n - X_i^6), \quad (3.17)$$

$$P^n = P^6 - \sum_{i=1}^{i=n} b_i (X_i^n - X_i^6), \quad (3.18)$$

где  $P^6$ ,  $P^n$ ,  $K^6$ ,  $K^n$  — производительность печи (т/сутки) и удельный расход кокса (кг/т чугуна) в базовом и прогнозном периодах;

$X_i^6$ ,  $X_i^n$  — соответствующие значения входных параметров в базовом и прогнозном периодах (удельный расход природного газа, температура горячего дутья, содержание железа в рудной части шихты, прочностные характеристики кокса и т. д.);

$a_i$ ,  $b_i$  — корректировочные коэффициенты, определяемые из модели доменного процесса или нормативно-справочной информации;



- рассчитывается масса оксидов, приходящих в печь и переходящих в шлак. При этом предполагается, что оксиды кальция, магния и алюминия, приходящие в печь с рудным материалом и золой кокса, полностью переходят в шлак. Что касается оксида кремния, то учитывается масса кремнезема, идущего на получение определенного содержания кремния в чугуна. Масса оксида титана корректируется на его частичное восстановление и переход в чугун. Масса оксидов марганца и железа в шлаке связана со степенью перехода этих элементов в чугун. Что касается массы серы в шлаке, то выполняется корректировка на ее улетучивание и планируемый переход серы в чугун;
- определяется удельный выход шлака и его химический состав (по балансу оксида кальция, балансу шлакообразующих элементов и т. п.), кг/т чугуна;
- в итоге определяются для проектного периода важнейшие свойства получаемого шлака:
  - основности шлака (обобщенная основность шлака по И.С. Куликову,  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ;  $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$ ;  $(\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ );
  - температура шлака;
  - вязкость шлака при температурах 1400 °С, 1500 °С и при температуре шлака;
  - активность серы в чугуне;
  - парциальное давление монооксида углерода в горновом газе;
  - выход шлака (по балансу оксида кальция, балансу шлакообразующих элементов и т. п.), кг/т чугуна;
  - масса серы, вносимая в печь, кг/т чугуна;
  - коэффициент распределения серы;
  - содержание серы в чугуне.

Общий алгоритм работы программы представляет собой последовательные операции ввода параметров, расчета и выдачи рекомендаций. Блок-схема программы изображена на рис. 3.7.

## *2.2. Расчет на заданную основность доменного шлака. Корректировка осуществляется составом местного агломерата (Проект 2)*

В отличие от предыдущего, в этом варианте осуществляется расчет на заданную основность доменного шлака, т. е. свойств доменного шлака при известных составах всех загружаемых ма-

териалов в доменную печь, за исключением местного агломерата. При этом корректировка основности шлака осуществляется составом (основностью) местного агломерата. В итоге определяется требуемый состав агломерационной шихты.

Как следует из блок-схемы, приведенной на рис. 3.7, в основе решения лежит итерационная процедура:

- на первой итерации состав агломерата задается ориентировочно, например по данным базового периода, и выполняется комплекс расчетов по алгоритму задачи «Проект 1»;
- если полученная основность шлака не совпадает с расчетной, то используется итерационная процедура и, исходя из заданной основности шлака, рассчитывается новое скорректированное значение основности агломерата;
- в дальнейшем выполняется расчет состава аглошихты (в расчете на 100 кг агломерата) на полученную основность агломерата (определяется расход известняка или иного флюса), который сводится к следующему:
  - по заданным долям рудных компонентов агломерационной шихты и их химическому составу находится средневзвешенный состав рудного материала аглошихты;
  - задаются расходы коксика, колошниковой пыли в аглошихту и их химические составы;
  - рассчитываются расходы материалов и известняка для получения агломерата заданной основности.

Для выполнения расчета состава агломерата решается система двух уравнений.

*Уравнение материального баланса*

$$\sum M_i - \Delta_1 \pm \Delta_2 = 100. \quad (3.19)$$

*Уравнение по основности агломерата*

$$\frac{\sum (M_i \text{CaO}_i)}{\sum (M_i \text{SiO}_{2i})} = B_A, \quad (3.20)$$

где  $M_i$  — удельные расходы компонентов шихты, кг/100 кг агломерата;

$\text{CaO}_i, \text{SiO}_{2i}$  — содержание оксидов в  $i$ -м материале, кг/кг;

$\Delta_1$  — потери массы шихты в результате выгорания серы, углерода, удаления гидратной влаги, удаления  $\text{CO}_2$  карбонатов, кг/100 кг шихты;

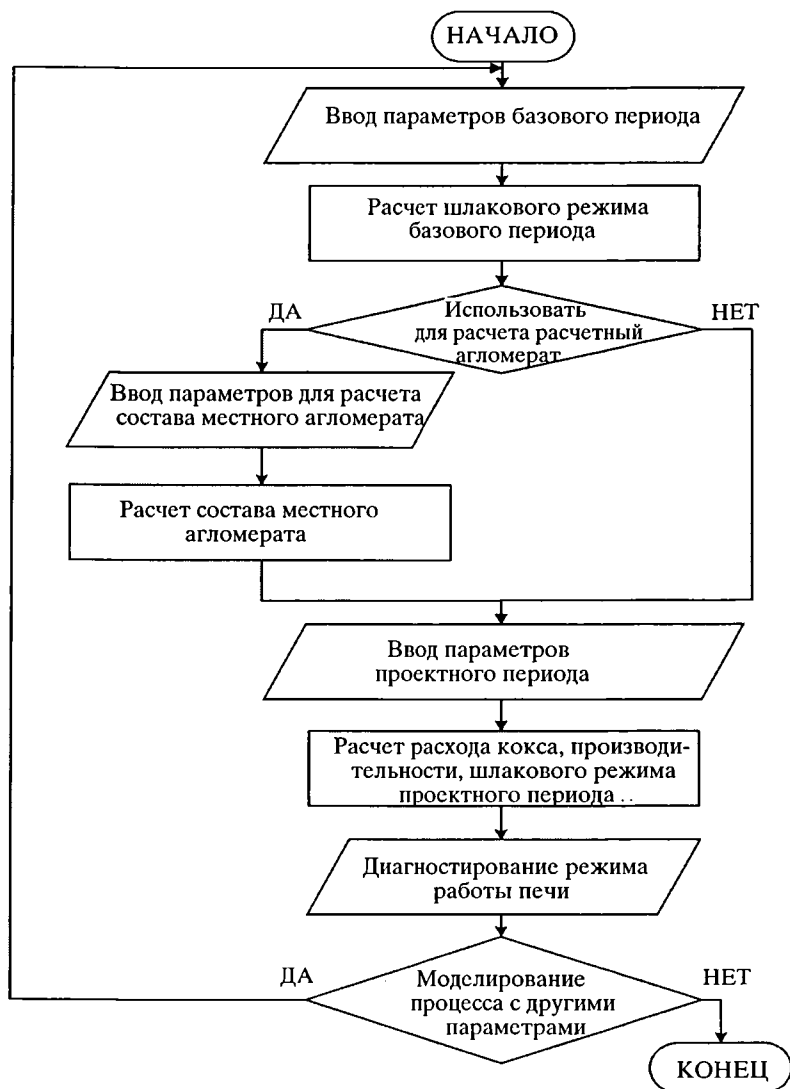


Рис. 3.7. Блок-схема программы выбора состава доменной и агломерационной шихты

$\Delta_2$  — изменение массы шихты в результате окисления (+) или восстановления (–) оксидов железа, кг/100 кг агломерата;

$B_A$  — заданная основность агломерата.

При расчете  $\Delta_1$  для каждого компонента аглошихты предполагается, что, помимо удаления гидратной влаги,  $\text{CO}_2$  карбонатов и выгорания углерода, удаляется 90 % серы. Поскольку аналитически рассчитать значение  $\Delta_2$  весьма сложно, то приходится задаваться или содержанием  $\text{FeO}$  в агломерате (содержание монооксида железа в агломерате ОАО ММК  $\text{FeO} = 12,0\text{—}12,5\%$ ), или степенью окисленности железа  $\phi = \text{FeO}/\text{Fe}$ , которая в условиях ММК составляет 0,21—0,22.

Таким образом, решается система двух уравнений и определяется расход средневзвешенного железорудного материала, всех его компонентов. В итоге при известных расходах всех компонентов аглошихты определяется состав агломерата заданной основности:

— на следующей итерации вводится полученный состав агломерата и выполняется комплекс расчетов по алгоритму задачи «Проект 1»;

— итерационная процедура повторяется до тех пор, пока расчетная основность шлака отличается от заданной не более чем на 0,001.

### 2.3. Расчет на заданную основность доменного шлака.

*Корректировка осуществляется расходом флюса в доменную шихту (Проект 3)*

Процедура расчета сводится к следующему:

- сначала осуществляется прямой расчет свойств доменного шлака при известных составах всех загружаемых материалов (см. Проект 1). В итоге определяются  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ , т. е. масса соответствующих оксидов в шлаке, кг/т чугуна. Если расчетная основность не совпала с заданной, то осуществляется корректировка расходов флюсов в доменную шихту;
- в случае изменения основности шлака за счет ввода в шихту известняка изменение его расхода  $G_{\text{и}}$  в доменную шихту определяется по уравнению

$$\frac{\text{CaO} + 0,01G_{\text{и}}\text{CaO}_{\text{и}}}{\text{SiO}_2} = B_{\text{зд}}, \quad (3.21)$$

где  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  — масса оксидов в шлаке, кг/т чугуна;

$\text{CaO}_{\text{и}}$  — содержание оксида кальция в известняке, мас. %;

$B_{\text{зд}}$  — заданная основность шлака, доли ед.;

- в случае корректировки основности шлака за счет ввода в шихту кварцита изменение его расхода  $G_{\text{КВ}}$  в доменную шихту определяется из уравнения

$$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + 0,01G_{\text{КВ}}\text{SiO}_{2\text{КВ}}} = B_{\text{зд}}, \quad (3.22)$$

где  $\text{SiO}_{2\text{КВ}}$  — содержание диоксида кремния в кварците, мас. %.

Очевидно, что корректировка основности шлака за счет снижения массы загружаемого в печь кварцита возможна только в случае, если в печи осуществлялась его загрузка;

- в дальнейшем осуществляется моделирование в соответствии с вариантом «Проект 1»);
- итерационная процедура повторяется до тех пор, пока расчетная основность шлака отличается от заданной не более чем на 0,001.

### *Условия выполнения программы*

Для выполнения программы требуется наличие операционной системы Microsoft Windows 98/ME/NT/2000/XP. В состав пакета входят исполняемый расчетный модуль (aglo.exe), а также конфигурационный файл (default.agl), содержащий первоначальные настройки. В процессе работы при сохранении пользователем вариантов настроек программа автоматически генерирует в установочный каталог файлы с расширением «\*.agl».

### *Выполнение программы*

Запуск программы на выполнение производится одним из следующих способов:

- непосредственно запуск exe файла двойным щелчком левой кнопкой мыши на файле с именем aglo.exe. После этого исходные данные будут загружены из файла default.agl (если такого файла не существует в каталоге, куда установлена программа, он будет создан автоматически). После этого в программу возможно загрузить файл с другими данными через главное меню «Файл/Загрузить» (сочетание клавиш Ctrl+O);

- двойной щелчок левой кнопкой мыши на файле с данными \*.agl (любой файл с расширением agl) запускает программу, и в нее автоматически загружаются данные из этого файла.

Если пользователь желает изменить данные, используемые программой при первоначальной загрузке, то необходимо заменить файл default.agl файлом с другими настройками.

После запуска программы на экране появляется диалоговое окно, в котором отображаются главное меню, переключатели режимов расчета, а также рабочие закладки для каждого режима. Главное меню включает в себя следующие пункты:

- *Файл* — предоставляет возможность загружать и сохранять варианты исходных данных, а также корректно завершать выполнение программы;
- *Правка* — сгруппированы операции копирования, вставки и удаления данных. Предусмотрено использование «горячих» клавиш;
- *Режим расчета проектного периода* — пользователь может выбирать вариант исходных данных по агломерату, который будет использован при расчете в проектном периоде (в частности, можно производить этот расчет на основе введенных данных по агломерату или на основе расчетного состава агломерата);
- *Настройка* — вызывается окно, в котором пользователь может производить изменение настроечных параметров пакета, а также изменять стиль представления диалоговых окон;
- *Печать отчетов* — получение твердых копий по результатам расчета программы с возможностью их предварительного просмотра;
- *Справка* — вызов справочной информации по работе с программой.

Внешний вид диалогового окна при первоначальной загрузке программы представлен на рис. 3.8.

### *Базовый период*

Расчет базового периода осуществляется при выборе переключателя «Базовый период». Технология проведения расчетов в этом периоде включает в себя последовательную работу с тремя вкладками — «Исходные данные», «Расходы и составы ЖРМ и флюсов» и «Результаты». Первые две предназначены для ввода и корректировки исходных данных в базовом периоде работы до-

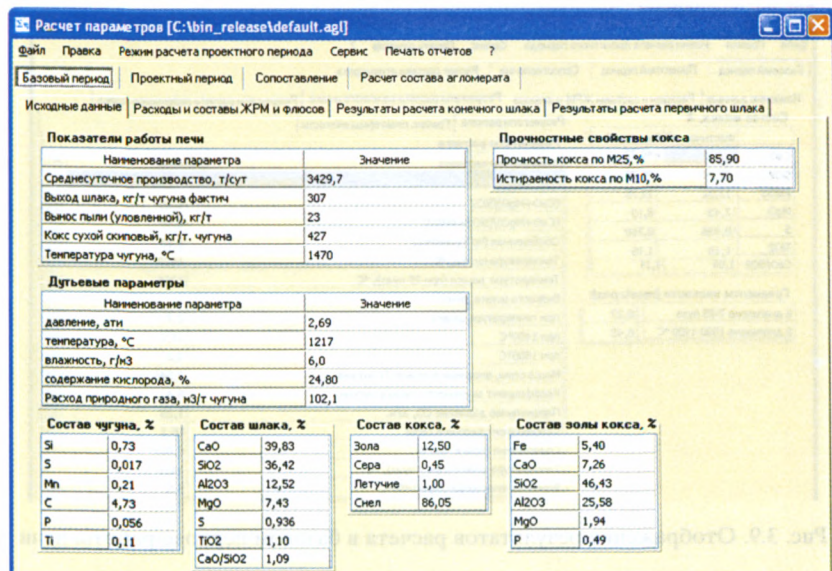


Рис. 3.8. Интерфейс программы расчета состава агломерационной шихты

менной печи. В частности, на вкладке «Исходные данные» пользователю в табличной форме отображаются показатели работы печи, дутьевые параметры, химические составы чугуна, шлака, кокса и золы кокса, а также прочностные свойства кокса. Вкладка «Расходы и составы ЖРМ и флюсов» предоставляет пользователю вводить виды и химические составы загружаемых в печь железорудных материалов и флюсов. После любой корректировки исходных данных производится немедленный расчет и его результаты отображаются на вкладке «Результаты» (рис. 3.9).

### Проектный период

В проектном периоде по заданным дутьевым параметрам, составу шлака, расходам и составам железорудных материалов и флюсующих добавок прогнозируются параметры, характеризующие шлаковый режим (состав шлака, его основность, температура), и производится диагностика.

Расчет проектного периода осуществляется при выборе переключателя «Проектный период». Технология проведения расчетов в этом периоде аналогична базовому расчету, т. е.



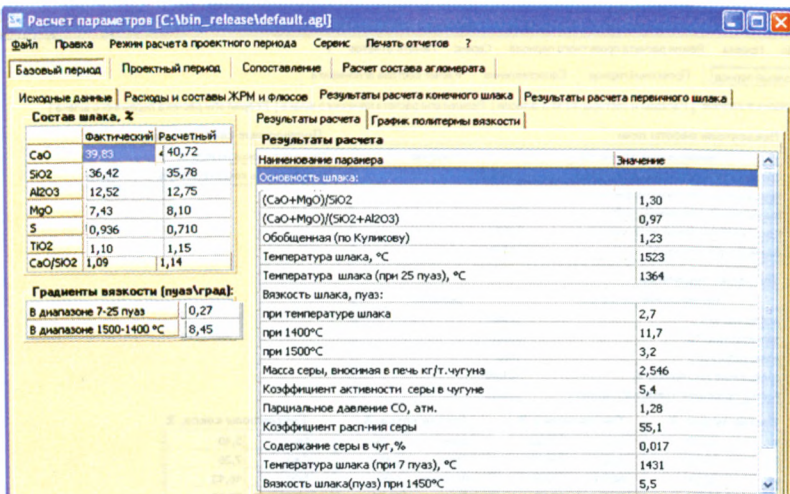


Рис. 3.9. Отображение результатов расчета в базовом периоде работы печи

включает в себя последовательную работу с тремя вкладками — «Исходные данные», «Расходы и составы ЖРМ и флюсов» и «Результаты».

Если в главном меню «Режим расчета проектного периода» отмечен пункт «На основе расчетного агломерата» (рис. 3.10), то параметры проектного периода будут определяться на основе расчетного агломерата. При этом ввести состав местного агломерата будет невозможно. Для того чтобы было возможно осуществить ручной ввод агломерата, необходимо выбрать пункт «На основе введенного агломерата».

После любой корректировки исходных данных производится немедленный расчет проектного периода, и его результаты отображаются на вкладке «Результаты». В этом случае помимо табличного вывода результатов в окне также формируются диагностические сообщения, характеризующие свойства шлака в проектном режиме. Список диагностических сообщений аналогичен описанным в параграфе 2.4 и приведен в табл. 3.3.

Режим расчета проектного периода

На основе введенного агломерата

На основе расчетного агломерата

Рис. 3.10. Выбор варианта расчета



Таблица 3.3

## Диагностические сообщения пользователю

Сообщение	Описание, действия по устранению
Шлак относится к типу «коротких». Возможно загромождение горна, застывание шлака в желобах	<p><i>Описание:</i> Данное сообщение появляется после выполнения расчета в случае, если расчетная величина градиента вязкости превышает предельно допустимую, которая введена пользователем в параметрах настройки пакета</p> <p><i>Действия по устранению:</i> Скорректировать исходные данные либо предельно допустимое значение градиента</p>
Вязкость шлака при температуре 1450 °С меньше $\eta_{\min}$ пауз. Шлак характеризуется малой вязкостью, обладает высокой агрессивностью к огнеупорной кладке и разрушает гарнисаж	<p><i>Описание:</i> Данное сообщение появляется после выполнения расчета в случае, если расчетная величина вязкости шлака при температуре 1450 °С меньше минимально допустимого значения вязкости при этой температуре, заданного в параметрах настройки пакета</p> <p><i>Действия по устранению:</i> Скорректировать исходные данные либо предельно допустимое значение минимально допустимой вязкости</p>
Вязкость шлака при температуре 1450 °С находится в пределах $\eta_{\text{доп}} - \eta_{\text{max}}$ пауз. Шлак характеризуется повышенной вязкостью в области рабочих температур	<p><i>Описание:</i> Данное сообщение появляется после выполнения расчета в случае, если расчетная величина вязкости шлака при температуре 1450 °С находится в интервале значений вязкости при нормальном режиме и максимально допустимой вязкости при этой же температуре, заданными в параметрах настройки пакета</p> <p><i>Действия по устранению:</i> Скорректировать исходные данные либо предельно допустимое значение максимально допустимой вязкости или вязкости при нормальном режиме</p>
Вязкость шлака при температуре 1450 °С превышает $\eta_{\text{max}}$ пауз и в области рабочих температур превышает допустимые пределы для нормального режима плавки	<p><i>Описание:</i> Данное сообщение появляется после выполнения расчета в случае, если расчетная величина вязкости шлака при температуре 1450 °С больше максимально допустимого значения вязкости при этой температуре, заданного в параметрах настройки пакета</p> <p><i>Действия по устранению:</i> Скорректировать исходные данные либо предельно допустимое значение максимально допустимой вязкости шлака</p>

Расчет параметров [C:\bin\_release\default.agj]

Файл Правка Режим расчета проектного периода Сервис Печать отчетов ?

Базовый период Проектный период Сопоставление Расчет состава агломерата

Сопоставление показателей базового и проектного периодов Графики полимеризации

**Сопоставление**

Наименование параметра	Базовый период	Проектный период	Изменение параметра
Пропускная способность, т/сут	3430	3404	-26
Удельный расход кокса, кг/т чугуна	427	445	18
Содержание Fe в железорудной части шихты, %	59,23	58,19	-1,04
Параметры дутья			
давление дутья, атм	2,7	2,7	0,0
температура дутья, град С	1217	1212	-5
влажность дутья, г/м <sup>3</sup>	6,0	3,4	-2,6
содержание кислорода в дутье, %	24,8	25,6	0,8
расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	102	88	-15
Состав чугуна %			
[S]	0,73	0,66	-0,07
[S]	0,017	0,019	0,002
[Mn]	0,21	0,23	0,02
[Ti]	0,11	0,10	-0,01
[C]	4,73	4,70	-0,03
[P]	0,06	0,07	0,01
Расход железорудных материалов, кг/т чугуна			
Агломерат	960,500	1103,313	142,813
Окатыши Соколовские	660,800	558,004	-102,796
Окатыши Лебединские	0,000	0,000	0,000
Окатыши Качанарские	45,100	16,909	-28,191
Окатыши Михайловские	0,000	0,000	0,000
Окатыши Костон.	0,000	0,000	0,000
Королек	0,000	0,000	0,000
Доменный присад	0,000	0,000	0,000
Руда	1,900	0,000	-1,900
Резерв	0,000	0,000	0,000
Итого :	1668,300	1690,920	22,620

Рис. 3.11. Сопоставление результатов расчета в базовом и проектном периодах работы доменной печи

### Сопоставление базового и проектного периодов

Результаты расчета базового и проектного режимов возможно сопоставить. Для этого необходимо выбрать переключатель «Сопоставление». При этом на экране отображается таблица, в которой представлены абсолютные значения показателей работы доменной печи и отклонение проектного показателя от базового. Вид окна приведен на рис. 3.11.

### Расчет состава агломерата

Для расчета состава агломерата необходимо установить соответствующий переключатель. В окне программы отображаются вкладки, которые позволяют производить поэтапный расчет. Первоначально пользователь работает с вкладкой «Расход

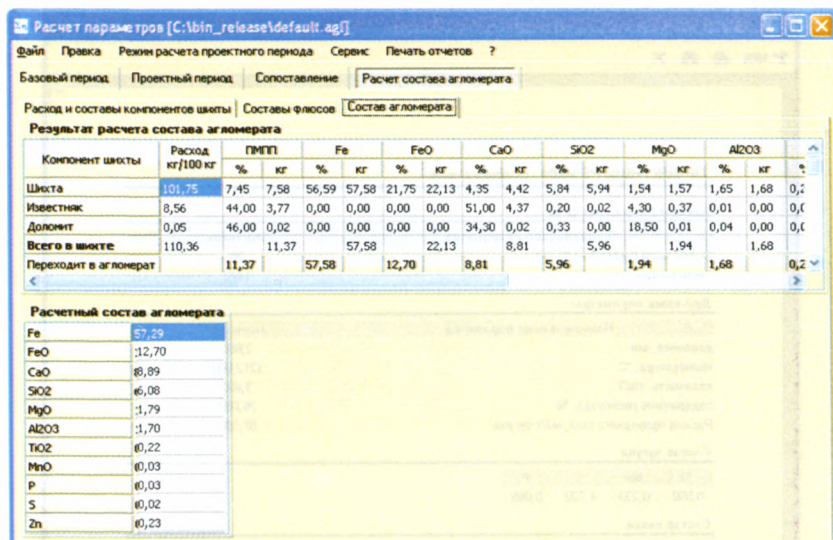


Рис. 3.12. Расчет состава агломерата

и составы компонентов шихты», в которой вводятся данные о химическом составе и долях выбранных компонентов аглошихты. Далее на вкладке «Составы флюсов» пользователь вводит или корректирует химические составы известняка и доломита, корректировочные коэффициенты, а также заданную основность агломерата и требуемое содержание в нем FeO.

Расчет производится немедленно, и результаты отображаются после выбора вкладки «Состав агломерата» (рис. 3.12).

### Отчеты

Для удобства пользователю в программе предусмотрена возможность печати отчетов. Возможны следующие виды отчетов:

- Базовый период;
- Проектный период;
- Расчет состава агломерата;
- Сопоставление.

Выбор соответствующего вида отчета осуществляется через главное меню программы. На рис. 3.13 показан фрагмент отчета по результатам расчета проектного периода работы доменной печи.

Предварительный просмотр

↑ 100%

ПРОЕКТНЫЙ РЕЖИМ Исходные данные

Показатели работы печи

Наименование параметра	Значение
Вынос пыли (уловленной), кг/т	20
Температура чугуна, °C	1470

Дутьевые параметры

Наименование параметра	Значение
давление, ати	2,660
температура, °C	1212,000
влажность, г/м3	3,400
содержание кислорода, %	25,600
Расход природного газа, м3/т чугуна	87,500

Состав чугуна

Si	Mn	C	P
0,660	0,230	4,700	0,066

Состав кокса

Зола	Сера	Летучи	Снеп
12,60	0,46	1,14	85,80

Состав золы кокса

Fe	CaO	SiO2	Al2O3	MgO	P
5,40	7,26	46,43	25,58	1,94	0,49

Стр. 1/4

Рис. 3.13. Фрагмент отчета по результатам проектного периода

*Расчет оптимального состава агломерационной  
(доменной) шихты*

В программном обеспечении предусмотрены следующие варианты целевых функции задачи оптимизации:

- минимум вязкости доменного шлака конечного состава при температуре шлака;
- минимум вязкости доменного шлака конечного состава при его заданной температуре;
- минимум содержания серы в чугуне;
- минимум удельного расхода кокса;
- максимум производительности;
- свертка указанных критериев с возможностью настройки весовых коэффициентов.

Дополнительно вводятся следующие ограничения:

- минимально и максимально допустимые значения вязкости шлака;

- минимальное и максимальное значения содержания серы в чугуне;
- минимальное и максимальное значения основности агломерата;
- минимальное и максимальное значения основности доменного шлака;
- минимальное и максимальное значения градиента вязкости шлака;
- минимальное и максимальное значения удельного расхода кокса и производительности.

Алгоритм расчета предполагает использование нескольких вариантов.

**Вариант 1.** Рассчитывается оптимальный расход флюса (известняка и др.) в аглошихту при заданных долях железорудных компонентов аглошихты, долях железорудных компонентов и расходах флюсов в доменной шихте. В основе итерационной процедуры оптимизации лежит методика расчета по варианту «Проект 2». Прямой расчет свойств доменного шлака происходит при известных составах всех загружаемых материалов, при этом задается не основность агломерата, а вводится начальное приближение расхода флюса (известняка) в аглошихту, т. е. достаточно выполнить только условие материального баланса (3.19).

Дополнительно предусмотрен ввод допустимого диапазона колебаний расхода известняка в аглошихту.

**Вариант 2.** Рассчитывается оптимальный расход известняка в доменную шихту при неизменных долях железорудных компонентов доменной шихты и их составах. В основе итерационной процедуры лежит методика расчета по варианту «Проект 3». Прямой расчет свойств доменного шлака осуществляется при известных составах всех загружаемых в печь материалов, при этом задается не основность шлака, а вводится начальное приближение расхода флюса (известняка, кварцита) в доменную шихту.

Дополнительно можно предусмотреть ввод допустимого диапазона колебаний расхода известняка в доменную шихту.

**Вариант 3.** Рассчитывается оптимальное соотношение компонентов железорудной части доменной шихты при постоянном расходе флюсов в доменной шихте. В основу оптимизации положен вариант «Проект 1». Необходимо учесть, что сумма весовых долей всегда равна единице. Дополнительно предусмотрен учет допустимых диапазонов колебаний весовых долей компонентов в железорудной части доменной шихты.



**Вариант 4.** Рассчитывается оптимальное соотношение компонентов рудной части агломерационной шихты при постоянном расходе флюсов в аглошихту и доменную шихту, а также постоянном соотношении компонентов (весовых долей) в железорудной части доменной шихты.

В основу оптимизации положен вариант «Проект 2», но не указывается заданная основность агломерата и шлака. Необходимо учесть, что сумма весовых долей всегда равна единице. Дополнительно предусмотрен учет допустимых диапазонов колебаний весовых долей компонентов в рудной части агломерационной шихты.

### 3.3. Алгоритм расчета задувочных шихт

Пуск доменной печи после ее строительства, а также после реконструкции начинается с задувки. Это исключительно важная операция, в значительной степени определяющая последующую кампанию доменной печи и технико-экономические показатели ее работы.

Технология задувки печи используется и после длительных стоянок печи, когда потери тепла достигают больших значений и требуется пуск печи при практически холодной шихте. При остановке печи на длительный промежуток времени необходимо устранить зону вязкопластических масс (зону когезии) путем опускания слоя кокса практически до уровня воздушных фурм с заполнением рабочего пространства печи шихтой, аналогичной составу задувочной шихты, методика расчета которой излагается в данной работе. В ином случае в слое шихты возможно образование куполообразного свода из застывших шлаковых образований, что, безусловно, будет сопровождаться существенными трудностями задувки печи.

Обзор специальной литературы по доменному производству показывает, что в настоящее время нет обоснованной методики расчета задувочных шихт. Существуют приближенные методики таких расчетов, основанные на практике задувки ранее пущенных печей. Это приводит к разнообразным отклонениям от нормального режима задувки, к получению некондиционных продуктов плавки, к возникновению термических ударов на огнеупорную кладку и, в конечном итоге, — к сокращению кампании доменных печей [59, 149—152].

Ниже излагается методика расчета задувочной шихты, выполненная применительно к задувке доменной печи объемом

2014 м<sup>3</sup> в условиях ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Прежде всего отметим, что к шихтовым материалам задувочной шихты предъявляются особые требования:

- 1) железорудные материалы должны иметь повышенную восстановимость. Выполнение этого требования связано с тем, что в момент задувки степень прямого восстановления оксидов железа велика, и это требует увеличения расхода кокса;
- 2) шихтовые материалы должны иметь повышенную механическую прочность. Это связано с особенностями их загрузки, когда из-за большой высоты падения шихты в незаполненную печь возможно образование большого количества мелких фракций, вызывающее подвисание шихты при подаче в печь дутья, что недопустимо в процессе задувки печи;
- 3) кокс должен быть малосернистым. Это требование обусловлено высоким удельным расходом кокса в задувочной шихте, значительным поступлением в печь серы и возникающими проблемами с удалением серы из чугуна.

Задувочная шихта рассчитывается на получение литейных чугунов средних марок с содержанием кремния 1,5—2,0 %. Это объясняется рядом причин.

Во-первых, при расчете задувочных шихт возможны ошибки в определении расхода кокса. В том случае, когда расход кокса оказывается заниженным, получают чугуны с пониженным содержанием в них кремния (могут быть и переделные чугуны). Напротив, при повышенном нагреве горна (при завышенном расходе кокса) в период задувки получают литейные чугуны более высоких марок.

Во-вторых, при плавке литейного чугуна наблюдаются графитизация огнеупорной кладки, закрытие швов в кладке и образование устойчивого гарнисажа.

При расчете задувочных шихт целесообразно ориентироваться на получение шлаков основностью  $\text{CaO/SiO}_2 = 0,9\text{—}1,1$ . Несмотря на значительное количество серы, приходящей в печь с коксом, увеличение основности шлака сверх указанной считается нецелесообразным из-за ухудшения их свойств — увеличения температуры плавления и роста вязкости шлака в области пониженных температур. Блок-схема расчета задувочной шихты в общем виде приведена на рис. 3.14.

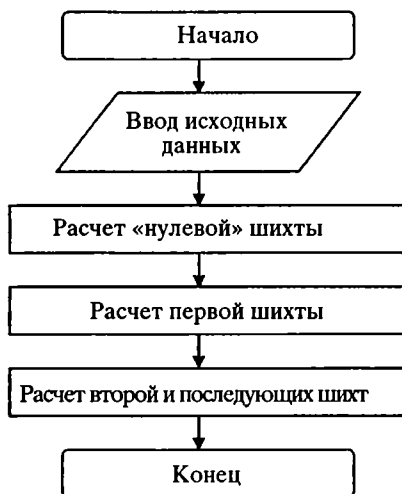


Рис. 3.14. Блок-схема расчета задувочной шихты

*Расчет задувочных шихт при увеличивающейся рудной нагрузке «Нулевая» шихта*

Традиционно задувочная шихта, или так называемая шихта заполнения, включает в себя «нулевую» шихту и несколько шихт (до 5—7) с увеличивающейся рудной нагрузкой.

«Нулевая» шихта состоит только из кокса, не участвует в процессе горения и играет роль дренажной коксовой насадки. В объем этой шихты входят зумпф (объем горна, определяемый высотой «мертвого» слоя), объем горна от уровня чугунной летки до уровня воздушных фурм, а также объем кокса, заключенный в конусе неподвижных материалов с основанием на уровне фурм и с углом наклона образующей, равной  $45^\circ$ .

В ряде случаев объем зумпфа заполняется гранулированным шлаком. На ряде предприятий задувка печи часто осуществляется на дровах, укладываемых на слой шлака до уровня воздушных фурм.

Масса кокса в «нулевой» шихте при загрузке только кокса определяется исходя из геометрических размеров горна с учетом отмеченных выше особенностей технологии задувки печей.



Масса кокса в «нулевой» шихте определяется из уравнения

$$G_K^{\text{ш0}} = \left\{ \frac{\pi \cdot (h_{\text{MC}} + h_{\text{Ф}}) \cdot d_{\text{Г}}^2}{4} + \frac{\pi \cdot (d_{\text{Г}} - 0,5)^3}{24} \cdot \text{tg} \alpha \right\} \cdot \frac{\gamma_{\text{Н}}^{\text{К}}}{(1 - \beta)}, \quad (3.23)$$

где  $h_{\text{MC}}$ ,  $h_{\text{Г}}$  — высота «мертвого слоя» и высота воздушных фурм, м;

$d_{\text{Г}}$  — диаметр горна печи, м;

$\alpha$  — угол образующей конуса неподвижных материалов (обычно принимается равным  $45^\circ$ );

$\gamma_{\text{Н}}^{\text{К}}$  — насыпная масса кокса, т/м<sup>3</sup>;

$\beta$  — уминка материалов, доли ед. (обычно принимается равной 0,15).

При заполнении горна печи дровами до уровня фурм объем кокса в «нулевой» шихте равен объему кокса в конусе неподвижных материалов, основанием которого является плоскость фурм, а образующая этого конуса наклонена к горизонту под углом  $45^\circ$ . Масса кокса в этом конусе определяется по уравнению

$$G_K^{\text{ш0}} = \frac{\pi \cdot (d_{\text{Г}} - 0,5)^3}{24} \cdot \text{tg} 45^\circ \cdot \frac{\gamma_{\text{Н}}^{\text{К}}}{(1 - \beta)}. \quad (3.24)$$

### *Первая шихта*

Далее в печь загружается первая шихта. Она включает в себя кокс и шлакообразующие материалы. Известняк или кварциты загружаются в количестве, необходимом для ошлакования золы кокса с заданной основностью шлака.

Поскольку зола кокса характеризуется высоким содержанием глинозема ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), то получающийся из этой шихты шлак имеет высокую температуру плавления и высокую вязкость. Для снижения концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$  до необходимых пределов (до 12—13 %) необходим ввод в первую шихту шлакообразующих материалов, уменьшающих концентрацию глинозема в получающемся шлаковом расплаве. В качестве шлакообразующего компонента целесообразно использовать доменный шлак с содержанием глинозема 7—8 %, термозит и другие материалы.

Структура модели расчета состава первой шихты приведена на рис. 3.15.

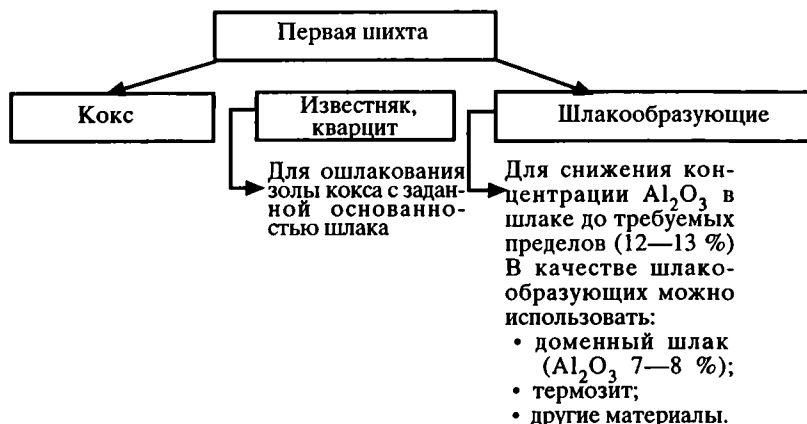


Рис. 3.15. К расчету состава первой шихты

Количество тепла от сжигания массы кокса первой шихты должно быть достаточным для нагрева огнеупорной кладки и массы материалов этой шихты до рабочих температур, характерных для нижней ступени теплообмена (рис. 3.16).

Последовательность выполнения расчетов по определению параметров первой шихты заключается в следующем:

1. Находится объем огнеупорной кладки, включающий объем кладки горна, заплечиков, распара и части шахты (на 1—2 м выше распара). Объем кладки рассчитывается по размерам профиля печи и толщине кладки.
2. Рассчитывается усредненная температура огнеупорной кладки отмеченных элементов печи исходя из распределения температур в нижней зоне печи. При этом предполагается, что внутренняя поверхность кладки должна быть нагрета в области воздушных фурм примерно до 1800 °С, а в

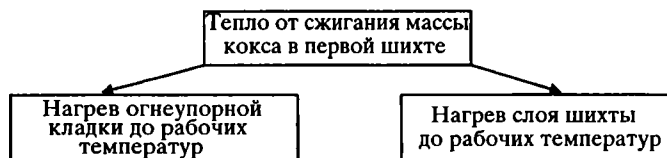


Рис. 3.16. К расчету расхода кокса в первую шихту

верхней части слоя первой шихты — до 950 °С (до температуры «резервной» зоны). Таким образом, средняя температура внутренней поверхности огнеупорной кладки должна составлять 1375 °С. Что касается температуры наружной поверхности кладки (обращенной к холодильникам), то принимаем температуру наружной стенки кладки на стыке с холодильниками равной 200 °С. Таким образом, усредненная температура кладки составляет примерно 790 °С.

3. Используя полученные данные (пункты 1, 2), можно найти количество теплоты, которое необходимо сообщить кладке для ее нагрева до «рабочих» температур.
4. Аналогичным образом находим количество теплоты, которое необходимо сообщить слою кокса первой шихты для его нагрева до «рабочих» температур. Примерный расчетный объем кокса первой шихты, включая горн, заплечики, распар и 1,5 м низа шахты, рассчитывается по уравнению

$$V_{\text{к}}^{\text{ш1}} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{\Gamma}^2 \cdot h_{\Gamma} + \frac{\pi}{12} \cdot h_3 \cdot (d_{\Gamma}^2 + D^2 + d_{\Gamma} \cdot D) + \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot (h_p + 1,5). \quad (3.25)$$

5. По балансу теплоты потребный расход кокса для нагрева шихты и огнеупорной кладки до рабочих температур определится из уравнения

$$G_{\text{к}}^{\text{ш1}} = \frac{Q}{q_c \cdot \eta_T}, \quad (3.26)$$

где  $Q$  — суммарный расход теплоты для нагрева кладки и шихты до рабочих температур, кДж;

$\eta_T$  — тепловой КПД;

$q_c$  — теплоотдача углерода кокса, сгорающего у фурм, кДж/кг.

6. Определяется расход шлакообразующего материала по заданному содержанию глинозема в шлаке ( $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{ЗАд}}$ ), получающегося из первой шихты, по уравнению

$$G_{\text{шл}}^{\text{ш1}} = \frac{G_{\text{к}}^{\text{ш1}} \cdot U_{\text{к}} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3^{\text{ЗАд}} - 0,01 \cdot G_{\text{к}}^{\text{ш1}} \cdot A \cdot \text{Al}_2\text{O}_3^{\text{ЗК}}}{\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{шл}} - \text{Al}_2\text{O}_3^{\text{ЗАд}} \cdot U_{\text{шл}}}, \quad (3.27)$$

где  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{Зад}}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{Зк}}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{Шл}}$  — заданное содержание глинозема в шлаке, а также содержание глинозема в золе кокса и шлакообразующем материале, %;

$U_{\text{к}}$ ,  $U_{\text{шл}}$  — выход шлакообразующих из кокса и шлакообразующего материала, кг/кг;

$A$  — содержание золы в коксе, %.

7. Для достижения заданной основности шлака далее производится расчет из балансовых уравнений (3.21), (3.22) потребного количества флюса —  $G_{\text{фл}}^{\text{Шл}}$ .
8. В связи с вводом в первую шихту шлакообразующего материала и флюса производится расчет дополнительного расхода кокса на нагрев и плавление этих материалов:

$$G_{\text{к}}^{\text{Доп.к.}} = \frac{(G_{\text{шл}}^{\text{Шл}} + G_{\text{фл}}^{\text{Шл}}) \cdot c \cdot t}{q_{\text{с}} \cdot \eta_{\text{т}}}, \quad (3.28)$$

где  $c$  — теплоемкость шлакообразующих материалов;

$t$  — температура шлака.

9. Располагая массами шихтовых материалов, входящих в состав первой шихты, их химическими составами, расчетным выходом чугуна из шихты, далее можно найти состав шлака, получающегося из этой шихты.
10. При изменившемся расходе кокса возникает необходимость корректировки состава шлака, поскольку при увеличенном расходе кокса меняется его состав — содержание глинозема в нем возрастает, а основность шлака снижается. В связи с этим осуществляется итерационная процедура вычислений с пункта 6 до получения заданной основности шлака при допустимом содержании глинозема.

### *Расчет второй и последующих шихт*

Во вторую и последующие шихты вводится железорудный материал, и для расчета расходов компонентов шихты производится ее расчет упрощенным методом А.Н. Рамма [60, 66].

При выборе исходных данных для расчета задувочных шихт учитываются особенности работы печи в раздувочный период. Так, степень прямого восстановления оксидов железа принимается равной  $r_d = 0,6—0,7$ , что связано с отсутствием подачи в печь

природного газа, слабым нагревом столба шихты в печи. Значение тепловых потерь, входящее в уравнение по расчету теплового эквивалента кокса, принимается равным 40—60 %, что связано с необходимостью прогрева огнеупорной кладки до рабочих температур. Температура горячего дутья принимается равной 600—750 °С.

Используя полученные расчетные данные по удельному расходу железорудного материала ( $G_{\text{ЖРМ}}$ ) и кокса ( $k$ ) по упрощенному методу А.Н. Рамма, можно найти значение рудной нагрузки ( $P_{\text{н}}$ ). После определения средних значений расхода кокса и агломерата производится расчет второй и последующих шихт.

Объем печи, оставшийся после загрузки «нулевой» и первой шихты, делится на требуемое количество задувочных шихт (обычно 4—5 шихт) —  $n$ .

Каждая последующая шихта, начиная со второй, имеет свое значение рудной нагрузки:

$$P_i = \frac{2 \cdot \bar{P}_{\text{н}}}{n}. \quad (3.29)$$

Объем печи для заполнения  $i$ -й шихтой:

$$V_i = \frac{V_0 - (V_{\text{к}}^{\text{ш0}} + V^{\text{ш1}})}{n}, \quad (3.30)$$

где  $V_0$ ,  $V_{\text{к}}^{\text{ш0}}$ ,  $V^{\text{ш1}}$  — полезный объем печи, объем «нулевой» и первой шихты, м<sup>3</sup>.

Масса кокса в  $i$ -й шихте:

$$M_{\text{к}}^i = \frac{V_i}{\frac{1}{\gamma_{\text{н}}^{\text{к}}} + \frac{P_i}{\gamma_{\text{н}}^{\text{ЖРМ}}}}, \quad (3.31)$$

где  $\gamma_{\text{н}}^{\text{к}}$ ,  $\gamma_{\text{н}}^{\text{ЖРМ}}$  — насыпные массы кокса и железорудного материала, т/м<sup>3</sup>.

В этом случае масса рудного материала в  $i$ -й шихте:

$$M_{\text{ЖРМ}}^i = M_{\text{к}}^i \cdot P_i. \quad (3.32)$$

По найденным массам  $M_i^K$  и  $M_{ЖРМ}^i$  находится выход чугуна:

$$e_{шi} = \frac{(0,01 \cdot M_K^i \cdot A \cdot Fe^{3K} + M_{ЖРМ}^i \cdot Fe^{ЖРМ}) \cdot \eta_{Fe}}{[Fe]}, \quad (3.33)$$

где  $Fe^{ЖРМ}$  — содержание железа в рудном материале, %;

$\eta_{Fe}$  — степень перехода железа в чугун, кг/кг;

$[Fe]$  — содержание железа в чугуне, %.

Далее по известным массам материалов, выходу шлакообразующих из этих материалов и химическому составу компонентов шихты находится выход шлака из шихты, производится расчет его состава, а также анализ полученного состава шлака. Затем делается вывод о необходимости ввода шлакообразующих материалов для снижения концентрации глинозема в шлаке до заданного уровня и затем ввода флюсов (известняка или кварцита) для получения заданной основности шлака.

Алгоритм расчета второй и последующих шихт представлен в общем виде на рис. 3.17.

В дальнейшем осуществляется проверка свойств шлака (вязкость, обобщенная основность, коэффициент распределения се-

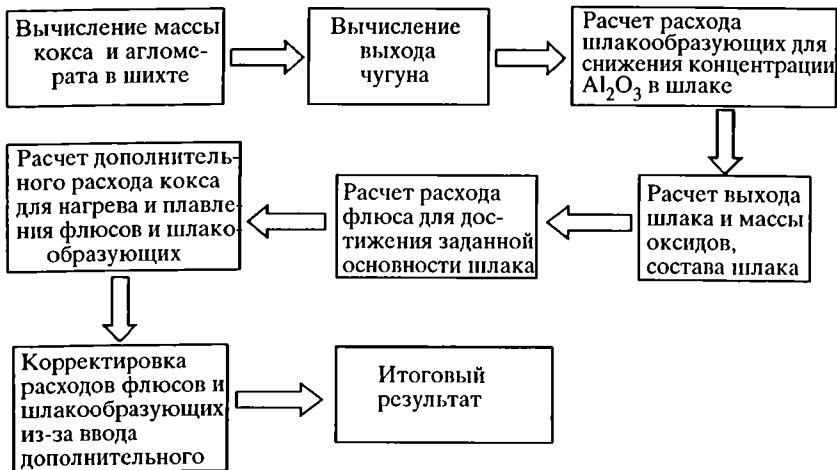


Рис. 3.17. Последовательность расчета второй и последующих шихт

ры), а также прогнозное определение содержания серы в чугуне, получающегося из задувочной шихты. При необходимости осуществляются итерационные процедуры. В методическом плане эта процедура не отличается от описанной ранее (см. параграф 2.4).

В качестве примера рассмотрен вариант расчета шихты для задувки доменной печи ОАО ММК полезным объемом 2014 м<sup>3</sup> с использованием агломерата, произведенного из 50 %-ного концентрата ССПО, 25 %-ного концентрата Стойленского ГОКа и 25 %-ной аглоруды Михайловского ГОКа. Основные размеры профиля печи, технический состав кокса и химический состав компонентов шихты представлены в табл. 3.4—3.6.

При этом приняты следующие исходные данные.

Степень перехода элементов в чугун, кг/кг:

железа —  $\eta_{Fe} = 0,999$ ;

марганца —  $\eta_{Mn} = 0,60$ ;

фосфора —  $\eta_P = 1,00$ .

Заданное содержание элементов в чугуне, %:

кремния —  $[Si] = 3,00$ ;

углерода —  $[C] = 4,00$ ;

железа —  $[Fe] = 92,00$ .

Теплоемкость чугуна —  $C_{\text{ч}} = 0,9$  кДж/(кг·К).

Теплоемкость шлака —  $C_{\text{шл}} = 1,26$  кДж/(кг·К).

Заданная основность шлака —  $CaO/SiO_2 = 1,0$ .

Температура горячего дутья —  $t_d = 700$  °С.

Таблица 3.4

Основные размеры профиля печи

Диаметр, м			Высота, м							
горн	распар	ко-лош-ник	полез-ная	мерт-вого слоя	горна	заплек-чиков	распар	шахты	ко-лош-ника	фурмы
9,75	10,9	7,3	29,4	1,1	3,6	3,0	1,7	18,2	2,9	3,1

Таблица 3.5

Технический состав кокса, %

Зола	Сера	Летучие	$C_{\text{шл}}$	Влага
12,7	0,428	0,80	86,70	5,00

Таблица 3.6

**Химический состав компонентов шихты**

Материал	Химический состав, %				
	Fe	Mn	S	P	FeO
Агломерат	58,16	0,08	0,03	0,018	12,00
Известняк	—	—	—	—	—
Термозит	—	1,16	1,45	—	—
Зола кокса	5,40	—	—	—	6,94
Кварцит	—	—	—	—	—

Материал	Химический состав, %					
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	пмпп
Агломерат	9,10	7,00	1,08	0,66	0,40	—
Известняк	51,80	0,17	0,17	3,20	—	44,78
Термозит	47,00	38,40	7,60	2,60	—	—
Зола кокса	7,80	48,10	24,60	2,00	—	—
Кварцит	—	96,00	—	—	—	—

Таблица 3.7

**Некоторые параметры шихты заполнения**

Показатель	Номер шихты						Всего
	«нуле- вая»	1	2	3	4	5	
Расходы, т:							
кокс	184,5	120,0	148,5	131,2	117,2	79,6	781,4
агломерат	—	—	76,5	135,2	181,6	164,0	557,3
термозит	—	57,8	59,3	41,1	25,0	9,0	192,2
кварцит	—	—	2,4	5,2	7,6	7,1	22,3
Рудная нагрузка, т/т	—	—	0,515	1,030	1,545	2,060	
Выход чугуна, т	—	0,9	49,4	86,4	115,6	104,2	356,5
Выход шлака, т	—	67,8	85,8	77,9	70,1	47,8	349,4
Состав шлака, %:	CaO						41,96
	SiO <sub>2</sub>						42,10
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						11,69
	MgO						2,92



Обессеривающая способность шлака

$\eta_{1400}$ , Па·с	$\eta_{1500}$ , Па·с	Обобщенная основность	$[C]_{\text{экв}}$ , %	$L_s^*$	$[S]$ , %
1,68	0,62	1,08	5,89	22,0	0,062

Содержание кислорода в дутье —  $\omega = 21$  %.

Влажность дутья —  $f = 4$  г/м<sup>3</sup>.

Температура чугуна —  $t_{\text{ч}} = 1450$  °С.

Степень улетучивания серы —  $\lambda_s = 0,15$ .

Температура колошникового газа —  $t_{\text{кг}} = 180$  °С.

Степень прямого восстановления железа —  $r_d = 0,5$ .

Тепловые потери печи —  $Z_c = 50$  % (меняются в пределах 30—50).

Тепловой КПД кокса —  $\eta_T = 0,5$ .

Состав задувочной шихты приведен в табл. 3.7.

Используя данные по составу шлака, можно определить обессеривающую способность шлака и прогнозное содержание серы в чугуне, представленные в табл. 3.8.

#### *Расчет задувочной шихты с регулируемым процессом шлакообразования и восстановления*

Разработанная методика предполагает разделение по высоте столба шихты шлакообразующего материала с тем, чтобы процесс шлакообразования начинался через заданное время после подачи в печь дутья (по практике задувки доменных печей ОАО НЛМК через 6—10 ч) [59]. Это исключает раннее шлакообразование при задувке печи и предотвращает быстрое закрытие шлаком труб, заложенных в чугунные летки, что позволяет длительное время осуществлять нагрев лещади горячим газом и предотвращать закозление горна холодным шлаковым расплавом.

Предлагаемая методика расчета задувочной шихты решает и другую задачу — разделение по высоте слоя шихты заполняемого железорудного материала и его расположение на такой высоте, которая исключает приход в горн печи невосстановленных оксидов железа и похолодание плавки.

Расчет «нулевой» шихты осуществляется аналогично описанному ранее.

*Первая шихта*

В отличие от рассмотренного ранее варианта, первая шихта состоит из двух частей:

- в первую часть загружается только кокс;
- во вторую часть могут загружаться шлакообразующий материал и флюсы.

Так же, как и ранее, производится расчет расхода кокса, шлакообразующих материалов и флюса в первой шихте. Различие заключается в том, что шлакообразующие материалы и флюсы этой шихты начинают грузиться в печь на высоте, обеспечивающей при заданном расходе дутья задержку процесса шлакообразования на заданное время.

Как сказано ранее, в данном варианте задувки печи ввод в первую часть первой шихты шлакообразующих материалов не предусматривается. Появляющиеся при горении кокса первой шихты шлакообразующие из золы кокса распределяются в межкусковых пространствах коксовой насадки и не образуют жидкоподвижного шлака. Такой метод задувки печи предполагает длительную работу горна печи без шлака, что дает возможность осуществлять отвод горячих газов через трубы, заложенные в чугунные летки. В ином случае при раннем шлакообразовании неизбежно заливание труб шлаком, прекращение движения газа в нижней части горна, что не позволяет нагреть лещадь до температур, обеспечивающих нормальную отработку первых порций расплавов чугуна и шлака. Расчеты показывают, что, в пересчете на трехкомпонентную систему, шлак будет иметь следующий состав:  $\text{CaO} = 9,7 \%$ ;  $\text{SiO}_2 = 59,8 \%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 30,5 \%$ . Воспользовавшись диаграммой состояния шлаковой системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  [136], находим, что температура плавления получающегося шлакового расплава составляет более  $1600^\circ\text{C}$ . Таким образом, можно полагать, что получающийся шлак может плавиться непосредственно только в фурменном очаге, а за его пределами он находится в виде тестообразных частиц малого размера.

Безусловно, что длительная работа печи без удаления золы кокса в жидкий шлак приведет к накоплению частиц золы в коксовой насадке и к возникновению проблем с газопроницаемостью коксовой насадки в нижней зоне печи. Промышленные задувки доменных печей НЛМК по технологии с задержкой шлакообразования показывают, что время работы печи до прихода шлака в горн должно быть более 6 часов и достигать до 10

часов без опасения значительного нарушения газодинамических свойств столба шихты.

Скорость движения шихты в печи и время подхода шлакообразующих материалов к фурмам определяются расходом дутья, подаваемого в доменную печь. Чрезмерная форсировка дутьем в начальный период задувки печи приводит не только к раннему шлакообразованию, но и приходу в непрогретый горн невосстановленных рудных материалов, железистого холодного шлака, что делает невозможным нормальный выпуск продуктов плавки из печи и может привести даже к «закозлению» горна.

Обычно в начальный период задувки в печь подается  $1/2$  номинального минутного расхода дутья, а после сдвижки шихты и продувки газовой трассы этот расход сокращается еще наполовину — т. е. до  $1/4$  номинального расхода дутья. В последующем расход дутья постепенно увеличивается. При заданном темпе раздувки печи в начальный период определяется объем кокса, сжигаемого в единицу времени, а затем, при использовании заданного времени задержки процесса шлакообразования, находится горизонт заложения шлакообразующего материала и флюсов.

Опыт задувок доменных печей ОАО ММК свидетельствует о том, что химический состав шлака и его свойства могут значительно различаться по выпускам. Поэтому необходимо выполнять проверку химического состава шлака, получающегося при проплавке первой шихты.

Фактическая основность шлака может отличаться от заданной ( $\text{CaO/SiO}_2 = 1,0$ ) из-за дополнительно вводимых шлакообразующего материала (термозита) и кокса на нагрев и плавление термозита. Поэтому используется итерационная процедура, позволяющая производить корректировку состава первой шихты по заданной основности шлака.

После определения массы флюса для корректировки основности шлака производится расчет дополнительного расхода кокса для нагрева и плавления вводимого флюса по изложенному ранее способу и корректировка состава и массы материалов первой шихты.

### *Вторая шихта*

В последующую вторую шихту вводится железорудный материал. Соотношение железорудного материала и кокса в этой шихте рассчитывается по упрощенной методике А.Н. Рамма с

учетом отмеченных ранее особенностей задувочных шихт. Расположение первых порций рудных материалов этой шихты по высоте печи имеет (по результатам задувок доменных печей НЛМК) исключительно важное значение. Это связывается с необходимостью хорошего прогрева и полного восстановления оксидов железа рудного материала. При малой высоте расположения железорудных материалов возможен приход в нижнюю часть печи железистого шлака, что вызовет похолодание низа печи, нарушение нормальной фильтрации расплавов в горне и сложности в отработке продуктов плавки при выпуске расплавов. Установлено, что первые порции железорудных материалов должны располагаться на уровне 11 м от уровня воздушных фурм (применительно к печи полезным объемом 3200 м<sup>3</sup>) [59].

Вероятно, что это расстояние связано со временем пребывания шихты в печи и это время определяется параметрами задувки и полезным объемом задуваемой печи. Расчеты показывают, что время прихода рудного материала с горизонта 11 м до уровня фурм при отмеченном ранее темпе раздувки составляет 20—22 часа. При заданном времени прихода железорудного матери-

Таблица 3.9

**Параметры задувочной шихты с разделением по высоте печи процессов  
шлакообразования и восстановления**

Показатель	Номер шихты					Всего
	«нулевая»	первая		вторая		
		1-я часть	2-я часть	1-я часть	2-я часть	
Расходы, т						<u>829,9</u>
Кокс	230,2	83,4	74,4	160,2	281,0	599,0
Агломерат	—	—	—	—	667,5	667,5
Термозит	—	—	67,1	32,6	57,2	156,9
Кварцит	—	—	—	12,0	21,1	33,1
Выход чугуна, т						432,3
Выход шлака, т						342,4
Состав шлака, %:						
CaO						41,27
SiO <sub>2</sub>						42,44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						11,13
MgO						2,95
Удельный выход шлака, т/т						0,79

ала к воздушным фурмам и темпе раздувки печи определяется горизонт заложения в шихте заполнения рудного материала.

Таким образом, вторая шихта делится на две части. В первую часть входят кокс, шлакообразующие материалы и флюс, а во вторую — кокс, ЖРМ, флюсы и железорудный материал.

Расчет расходов шлакообразующих и флюсов во второй шихте в идеологическом плане не отличается от ранее описанного, т. е. они определяются исходя из заданного состава шлака ( $\text{CaO/SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Результаты расчета задувочной шихты с разделением по высоте шихты заполнения процессов шлакообразования и восстановления сведены в табл. 3.9, а расположение задувочных шихт и изменение рудной нагрузки по высоте печи представлено на рис. 3.18.

### *Проведение раздувочного периода*

После загрузки в печь шихты заполнения и проведения подготовительных работ производится подача в печь дутья. Опытном задувок доменных печей ОАО ММК установлено, что задувку доменной печи нужно производить на избыточном давлении горячего дутья 0,5 ати на всех открытых фурмах.

После продувки газовой системы давление горячего дутья снижается до 0,25—0,30 ати, а затем постепенно поднимается согласно данным табл. 3.10.

С ростом давления дутья возрастает и его расход. Ориентировочно этот расход определяется по уравнению

$$P_{\text{д}} = A \cdot Q_{\text{д}}^{1,7}, \quad (3.34)$$

где  $P_{\text{д}}$  — избыточное давление горячего дутья, ати;

$Q_{\text{д}}$  — минутный расход дутья,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;

$A$  — коэффициент пропорциональности.

Значение  $A$  впоследствии рассчитывается по фактическим данным  $P_{\text{д}}$  и соответствующему этому давлению минутному расходу дутья в начальный период задувки печи (см. п. 2.3).

Наконец, при установлении параметров задувки нужно иметь в виду, что необоснованный выбор температуры дутья, содержания в нем кислорода может привести к получению недопустимых температур горения кокса в фурменном очаге. Приводимые ниже расчеты по определению теоретической температуры горения выполняются для начального момента задувки печи, когда природный газ еще не подается.

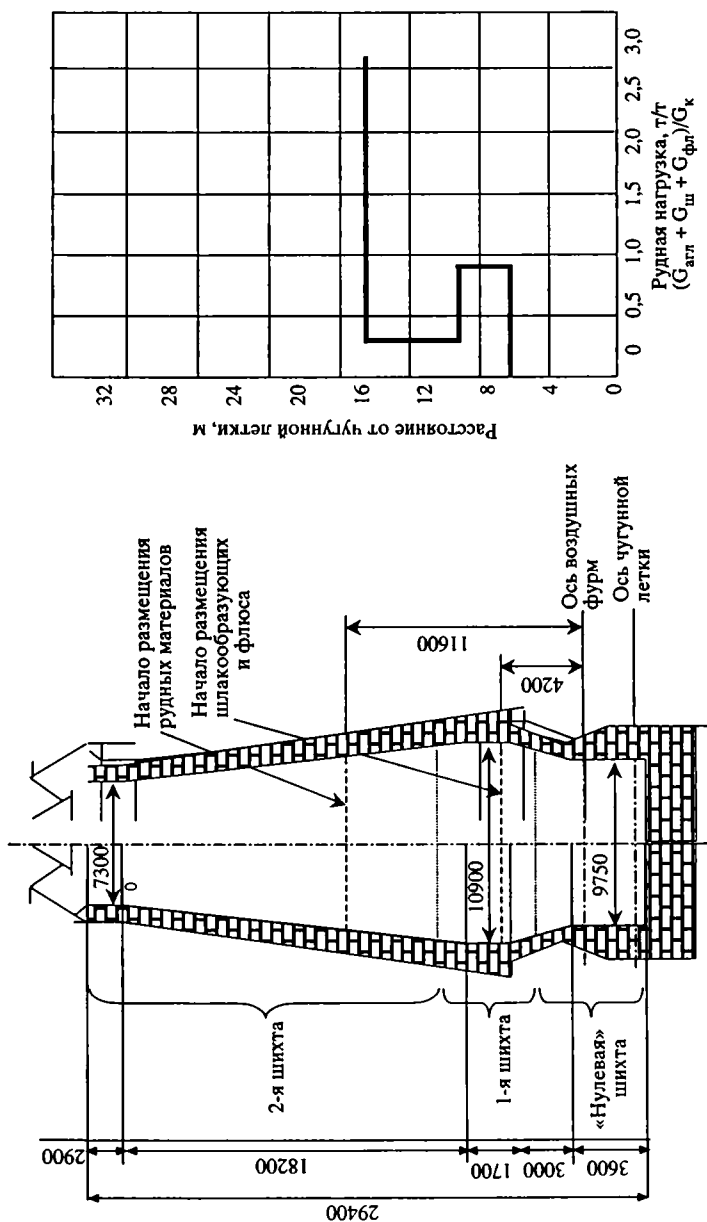


Рис. 3.18. Расположение задувочных шихт и изменение рудной нагрузки по высоте доменной печи объемом 2014 м<sup>3</sup>

Опыт задувок доменных печей ОАО ММК свидетельствует о том, что в начальный период задувки печи значение теоретической температуры горения должно быть на минимально возможном уровне — около  $1850^{\circ}\text{C}$ . Это объясняется тем, что в момент задувки в горне печи отсутствуют потребители тепла — рудные компоненты и шлакообразующие и из-за чрезмерного разогрева нижней части печи при сжигании кокса на фурмах неизбежны горячие подвисания шихты.

Для поддержания теоретической температуры горения на минимальном уровне единственным мероприятием в начальный период задувки является увлажнение дутья.

Температура дутья в начальный период задувки устанавливается равной  $700^{\circ}\text{C}$  и в течение 24 ч остается на этом уровне. Затем она растет и достигает  $1000^{\circ}\text{C}$  к 110 ч после начала подачи дутья в печь.

Для начального периода задувки печи очень важным является правильное установление влажности дутья. Для устранения возможных горячих подвисаний в нижней зоне печи необходимо увлажнение до  $30\text{—}35\text{ г/м}^3$  для поддержания теоретической температуры горения на уровне  $1850^{\circ}\text{C}$ . По истечении 4 ч после начала задувки с вводом в печь природного газа устанавливается естественная влажность дутья. Одновременно в горн печи подается природный газ, расход которого устанавливается из условия получения теоретической температуры горения ( $t_r$ ) на уровне  $1850^{\circ}\text{C}$ .

Поскольку по ходу раздувочного периода возрастает температура горячего дутья, что приводит к росту теоретической температуры горения, то производится корректировка расхода природного газа.

Через 48 ч после задувки в печь подается технологический кислород и вновь корректируется расход природного газа для получения  $t_r$ , равной  $1950^{\circ}\text{C}$ .

Установленные расходы природного газа и технологического кислорода остаются далее неизменными до окончания работы печи на литейном чугуна.

Давление колошникового газа устанавливается в соответствии с возрастающим давлением горячего дутья и допустимым расчетным значением перепада давления газа по высоте слоя шихты ( $\Delta P_{\text{ш}}$ ). Значение этого перепада рассчитывается исходя из предельной степени уравнивания газом шихты заполнения.

В табл. 3.10 приведен вариант изменения некоторых параметров доменной плавки раздувочного периода для доменной печи полезным объемом  $2014\text{ м}^3$ .







### 3.4. Алгоритм корректировки теплового режима доменной печи на остановках

В процессе эксплуатации доменной печи возникает необходимость ее остановки. Эти остановки могут быть связаны с заменой вышедших из строя деталей, узлов и отдельных конструкций печи и вспомогательного оборудования, с демонтажем и установкой сложных конструкций (к примеру, засыпного и распределительного аппаратов и т. п.). Остановки могут быть кратковременными и длительными (8 часов и более).

В том случае, когда предполагается длительная остановка печи, резерв тепла в печи задается заранее. Так, к примеру, перед остановкой печи на капитальный ремонт III разряда содержание кремния в чугуна доводится до 1—1,5 % (при выплавке передельного чугуна).

При моделировании тепловой работы доменной печи при остановках можно выделить три периода (рис. 3.19):

- моделирование тепловых процессов перед остановкой печи;
- моделирование тепловых процессов во время стоянки печи;
- моделирование тепловых процессов в послепусковой период.

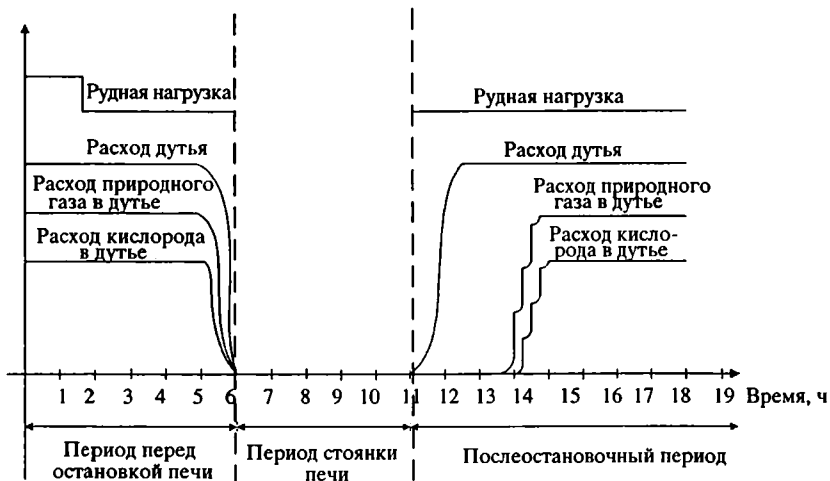


Рис. 3.19. Изменение параметров воздействий при остановках

Для каждого из периодов предложены математические модели, которые с приемлемой точностью описывают тепловые процессы работы печи, протекающие в соответствующий период.

*Моделирование тепловых процессов перед остановкой  
печи и в послепусковой период*

Математическое описание тепловых процессов в рассматриваемых периодах должно отражать поведение объекта в динамике, т. е. математическая модель должна воспроизводить переходные режимы процесса при изменении основных технологических параметров (характеристик дутья и шихтовых материалов).

К нестационарным относят переходные режимы, проявляющиеся при существенном изменении входных значений того или иного параметра или нескольких параметров технологического процесса. Эти переходные режимы обычно длятся не менее периода, равного времени пребывания шихтовых материалов в печи, независимо от того, по каким параметрам шихты или дутья возникло возмущение. При условии постоянства входных значений всех параметров в новых условиях переходный режим завершается установлением нового стационарного состояния технологического процесса.

Несмотря на то, что исследованию динамики доменного процесса, как в нашей стране, так и за рубежом, уделялось немало внимания, к настоящему времени накоплено недостаточно данных, на основании которых можно было бы описать переходные процессы по отдельным каналам в любых условиях плавки.

Недостаточная изученность динамических характеристик доменного процесса во многом объясняется сложностью их экспериментального определения.

Доменному процессу свойственны такие особенности, как наличие сильных шумовых воздействий и значительных погрешностей при технологическом контроле; нестационарность условий и показателей работы печи и др. В этой ситуации при формальном применении известных способов изучения динамических свойств объектов (например, с использованием методов статистической динамики или нанесения искусственного возмущения на входе) можно получить характеристики процесса, не только количественно, но и качественно отличающиеся от истинных. Отсюда вытекает необходимость строгого соблюдения предпосылок применения тех или иных методов. В последнее время исследование динамических свойств доменной печи осу-

ществляют в основном путем построения теоретических моделей, по данным нормальной эксплуатации печи с применением статистических методов, а также на основе результатов специально поставленных экспериментов или путем отбора характерных периодов нормальной работы печи, содержащих входные сигналы желаемого типа [8, 11, 36, 37].

Первое направление представляет особый интерес, так как модель позволяет оценивать динамические характеристики процесса в любых условиях доменной плавки. Однако ввиду сложности закономерностей доменного процесса разработанные теоретические модели не учитывают в полной мере все особенности протекания процесса, что не позволяет в ряде случаев с достаточной точностью определить динамические характеристики печи.

Оператор печи в большинстве случаев воздействует на процесс скачкообразным изменением одного из регулирующих органов, поэтому путем просмотра данных нормальной эксплуатации печи можно установить сравнительно чистые переходные процессы. Однако такие периоды в практике управления доменным процессом встречаются крайне редко. Значительно чаще изучаемый входной сигнал изменяется скачкообразно при наличии изменения других входных величин.

Как при определении динамических характеристик статистическим путем, так и при отборе характерных периодов нормальной работы печи, содержащих сигналы желаемого типа, неизбежно наличие обратной связи между управляющим воздействием и выходным сигналом, поскольку регулирование доменного процесса в значительной мере осуществляется по отклонению. Это приводит к искажению конечных результатов и затрудняет определение динамических характеристик по каналам, входом которых являются управляющие воздействия. В такой ситуации для изучения динамических свойств печи по каналу «управляющее воздействие — выходная величина» во многих случаях практически единственно возможным методом остается метод наложения искусственного возмущения на входе при постоянстве прочих входных величин. Этот метод давно известен и широко используется при изучении динамических характеристик различных объектов. Основным его недостатком являются повышенные затраты на исследования.

Опыт показывает, что динамические характеристики доменной печи по одним и тем же каналам, полученные разными спо-

собами и в различных условиях плавки, имеют не только количественное, но и качественное различие.

С использованием разработанной во ВНИИМТ кинетико-динамической модели были определены динамические характеристики доменных печей по различным каналам управления [36]. Моделирование проводили при ступенчатом изменении управляющего воздействия с последующим расчетом динамики технологических параметров работы печи во времени (кривые разгона). В качестве воздействий были выбраны изменения рудной нагрузки, влажности дутья, содержания кислорода в дутье, расхода природного газа, температуры и расхода дутья.

На рис. 3.20 представлено изменение во времени содержания кремния в чугуна по различным каналам воздействий.

Так, при увеличении рудной нагрузки вследствие увеличения теплоемкости потока шихты температуры в шахте печи и колошниковом газе снизились, уровень зоны плавления опустился вниз, ухудшилась степень обработки материалов газами. Производительность печи и скорость схода шихты при этом увеличиваются. Уменьшение времени нагрева чугуна в нижней части печи и повышение степени прямого восстановления железа определяют снижение нагрева чугуна. Изменения в нагреве продуктов плавки начинают проявляться примерно через 5 ч после истечения времени пребывания материалов в печи (один оборот). Коэффициент передачи по каналу «рудная нагрузка — содержание кремния в чугуна» составил 0,1 % Si / 100 кг кокса в подачу.

Снижение расхода природного газа на 3 % (от объема дутья) приводит к повышению теоретической температуры горения в фурменных очагах за счет снижения затрат тепла на разложение природного газа, к повышению производительности доменной печи и скорости схода шихты и к снижению уровня температуры в шахте печи и колошниковом газе. Кривая изменения содержания кремния в чугуна во времени имеет знакопеременный характер, что обусловлено безинерционным действием изменения температур в горне печи и инерционным (через время одного оборота материалов) воздействием изменения интенсивности противотока в объеме печи. Если в начальный момент времени в результате повышения температуры в горне, связанного со снижением затрат тепла на разложение природного газа, содержание Si возрастает, то по истечении времени, равного времени одного оборота материалов, доменная печь начинает холодеть. Это обусловлено увеличением интенсивности схода материалов,

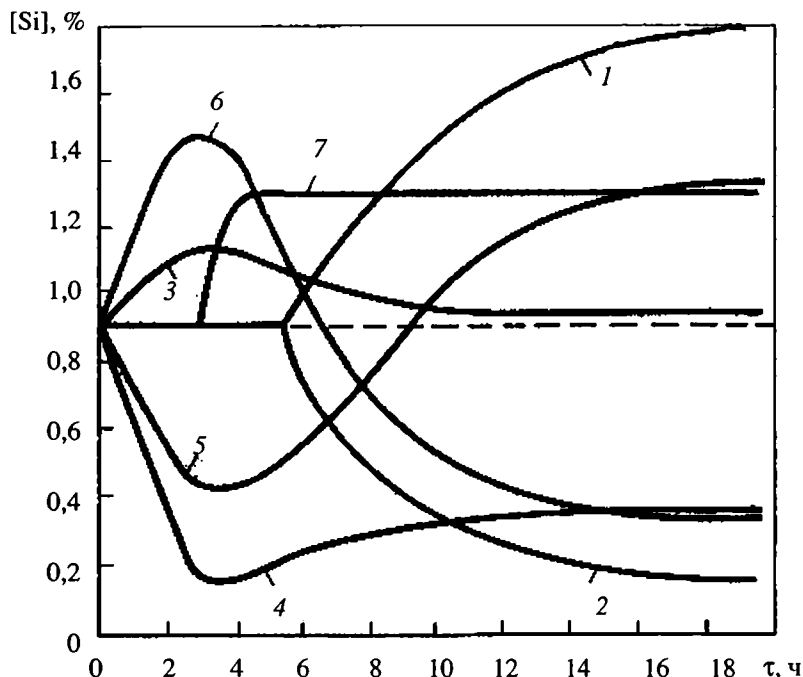


Рис. 3.20. Временные характеристики доменной печи № 5 Ждановского металлургического комбината им. Ильича, найденные методом моделирования при использовании ступенчатых воздействий [36]:

1 — снижение рудной нагрузки на 0,2 т/г; 2 — повышение рудной нагрузки на 0,2 т/г; 3 — повышение температуры дутья на 50 °С; 4 — повышение влажности дутья на 3 %; 5 — снижение содержания кислорода в дутье на 3 %; 6 — снижение расхода природного газа на 3 % (к дутью); 7 — снижение расхода дутья на 10 %

снижением скорости восстановления из-за снижения уровня температуры в шахте и уменьшения содержания водорода в восстановительном газе.

Уменьшение содержания кислорода в дутье приводит к снижению производительности печи, росту температуры в шахте печи и колошникового газа. Кривая изменения содержания кремния в чугуне (как и при изменении расхода природного газа) имеет знакопеременный характер. Если в первый момент времени после снижения содержания кислорода уменьшение уровня

температуры в горне привело к снижению содержания [Si], то после прохождения одного оборота материалов снижение интенсивности противотока, повышение температуры в шахте и увеличение степени восстановления шихты привели к разогреву продуктов плавки. Полное время переходного процесса составило по этому каналу 18—20 ч (~3,5 оборота материала).

Сравнение коэффициентов передачи по каналу «рудная нагрузка — содержание [Si]», полученных на модели ВНИИМТ, с экспериментальными данными показало хорошее соответствие. Очевидно, для целей управления доменной плавкой динамические характеристики по этому каналу можно определить методом математического моделирования, аппроксимируя переходную функцию «р/к—Si» инерционным звеном первого порядка с запаздыванием.

$$h_{Si} = K_{об} \left( 1 - e^{-\frac{\tau - \tau_{зап}}{T_{об}}} \right),$$

где  $K_{об}$  — коэффициент передачи по каналу «р/к—Si»;

$T_{об}$  — постоянная времени объекта;

$\tau_{зап}$  — время чистого запаздывания.

Исследований по каналам «расход природного газа, содержание кислорода в дутье, влажности дутья, его температуры — содержание [Si]» очень мало, что не позволяет выявить по результатам экспериментов даже общих тенденций. Кроме того, в промышленных экспериментах не удалось зафиксировать знакопеременный (колебательный) характер переходного процесса, что было обнаружено при математическом моделировании. Для аппроксимации переходной функции по этим каналам недостаточно инерционного звена первого порядка и необходимо использовать уравнение второго порядка следующего вида:

$$h_{Si} = \pm K_{об1} \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{T_{об1}}} \right) \pm K_{об2} \left( 1 - e^{-\frac{\tau - \tau_{зап}}{T_{об2}}} \right), \quad (3.36)$$

где  $K_{об1}$ ,  $K_{об2}$  — коэффициент передачи;

$T_{об1}$ ,  $T_{об2}$  — постоянные времени объекта;

$\tau_{зап}$  — время чистого запаздывания.

Первый член уравнения (3.36) отражает начальное изменение содержания кремния в чугуна без запаздывания, а второй член — изменение знака кривой переходного процесса и величины Si с запаздыванием.

Факторов, обуславливающих расхождение расчетных и экспериментальных данных по динамике доменной плавки, достаточно много: неучет отдельных сторон доменного процесса; наличие помех в опытах, часто соизмеримых с величиной основного возмущения; наличие обратной связи между управляющими воздействиями и выходным сигналом, что искажает величину коэффициента передачи, и т. д.

Таким образом, качественный вид переходных процессов по различным каналам воздействий (структура модели) принималась переменной. При этом параметры, характеризующие статический режим работы объекта, т. е. коэффициенты передачи по различным каналам воздействий  $K_{обj}$  (рудная нагрузка, влажность, температура горячего дутья, расходы кислорода и природного газа), рассчитывались по модели доменного процесса (см. главу 2). Динамические параметры ( $T_{об1}$ ,  $T_{об2}$ ,  $\tau_{зап}$ ) с колебательным характером переходных процессов, т. е. по каналам воздействий «расход природного газа, содержание кислорода в дутье, влажности дутья, его температуры — содержание [Si]» принимались такими же, как в модели ВНИИМТ.

При воздействии рудной нагрузкой время чистого запаздывания  $\tau_{зап}$  рассчитывалось по времени пребывания материалов в печи, а постоянная времени  $T_{об}$  определялась методом параметрической идентификации [153]. Таким образом,  $T_{об}$  по этому, основному каналу воздействий является фиктивной переменной, в которой физически и учитываются все факторы, обуславливающие расхождение расчетных и экспериментальных данных по динамике доменной плавки, оцениваемой содержанием кремния в чугуна.

Учитывая гипотезу линейности рассматриваемого объекта, реакцию системы на любую сумму  $n$  входных воздействий, можно рассчитать по интегралу

$$\Delta Si(\tau) = \sum_{j=1}^n \int_0^{\tau} h_{Si}^j(\tau - t) \frac{dX_{BX}^j(t)}{dt} dt, \quad (3.37)$$

где  $\Delta Si(\tau)$  — изменение во времени приращения [Si];

$h_{Si}^j(\tau)$  — переходная функция системы по  $j$ -му каналу воздействия;



$X_{вх}^j(\tau)$  — изменение во времени приращения  $j$ -го входного воздействия.

*Моделирование тепловых процессов во время стоянки печи*

Охлаждение слоя шихты в нижней части доменной печи как в процессе ее остановки, так и стоянки при отсутствии подачи в нее дутья происходит по следующим основным причинам:

- 1) за счет протекания эндотермической реакции восстановления монооксида железа, находящегося в вязкопластическом состоянии и первичном шлаковом расплаве при контакте этого оксида с углеродом коксовой насадки;
- 2) за счет уноса тепла выходящими из печи газами, получившимися в процессе прямого восстановления оксидов железа;
- 3) за счет тепловых потерь печи в период остановки печи с охлаждающей водой и в окружающее пространство.

Структура математической модели расчета потерь тепла при стоянке доменной печи включает расчет трех указанных статей. Рассмотрим возможность расчетного определения каждой из указанных статей потери тепла шихтой в процессе остановки.

Основной принцип, положенный в основу метода расчета необходимого резерва тепла в нижней части доменной печи, заключается в обеспечении нормального теплового режима зоны вязкопластического состояния железорудных материалов. При этом исходили из того, что важнейшим положением доменного процесса является разделение процессов восстановления и плавления железорудных материалов, причем именно до перехода их в жидкое состояние, т. к. невосстановленные оксиды железа приводят при высоких температурах, а следовательно, и скоростях восстановления к образованию гетерогенной газошлаковой смеси из-за интенсивного восстановления монооксида железа раскаленным коксом с последующим закупориванием для газа проходов между кусками кокса.

Работами С.В. Шаврина, А.А. Гиммельфарба и других показано, что шлак, содержащий 15—20 % монооксида железа, вообще не может фильтроваться через раскаленную до 1500 °С коксовую насадку [88, 137, 154, 155, 156]. При этом железистые шлаковые расплавы вследствие интенсивного восстановления углеродом образуют малоподвижные массы и попадают в горн только после значительного снижения в них содержания закиси же-

леза. Эти положения подтверждаются и результатами исследований на замороженных доменных печах, выполненных И.Д. Баллоном, немецкими и японскими исследователями [157—159].

Обобщение результатов опубликованных в научно-технической литературе исследований позволяет сделать вывод о том, что при нормальном режиме доменной плавки необходимо обеспечивать восстановление железорудных материалов на горизонте температур, соответствующих усадке в 40—50 % до содержания монооксида железа в железистом шлаке не более 20 %.

Расчет затрат тепла на протекание эндотермической реакции восстановления монооксида железа, находящегося в вязкопластическом состоянии и первичном шлаковом расплаве, при контакте этого оксида с углеродом коксовой насадки заключается в следующем.

1. Необходимо определить прежде всего температурные границы зоны вязкопластического состояния материалов:

$T_{н.пл}$  — температура появления первичных жидких фаз (температура начала размягчения);

$T_{к.пл}$  — температура конца размягчения, т. е. температура, при которой материал, находясь в пластичном состоянии, имеет примерно 50 % усадки слоя, что обеспечивает достаточный контакт оксидов железа в железорудном материале с углеродом кокса;

$T_p$  — температура расплавления, т. е. температура, при которой происходит образование подвижного шлакового расплава.

Полагаем, что температурный интервал вязкопластического состояния железорудных материалов определяется соотношением

$$\Delta T_{вп} = T_p - T_{к.пл}. \quad (3.38)$$

2. Определяются массовые доли материалов в железорудной части шихты и средневзвешенное содержание железа (Fe) и монооксида железа (FeO).
3. Следует определить выход шлакообразующих из средневзвешенного железорудного сырья, пренебрегая содержанием оксидов марганца, фосфора, по уравнению

$$U_{жрм} = 0,01 \{ 100 - [(Fe^p - 0,7778FeO)1,4286 + FeO] \}. \quad (3.39)$$

4. Необходимо определить температуры начала появления жидких фаз  $T_{н.пл}$  и расплавления, т. е. температур, при ко-

торых происходит образование подвижного шлакового расплава (см. п. 2.4) для каждого из компонентов железорудного сырья, и средневзвешенные их значения.

Температура  $T_{к.пл}$  — температура конца размягчения, т. е. температура, при которой материал, находясь в пластичном состоянии, имеет примерно 50 % усадки, определяется по уравнению

$$t_{н}^{п.в} = \varphi(T_{н.пл.} + T_p), \quad (3.40)$$

где  $\varphi$  — параметр настройки модели (рекомендуется  $\varphi = 0,5$  и уточняется в процессе настройки модели).

5. Рассчитывается объем печи, в котором располагается зона вязкопластического состояния железорудных материалов.

Для этого определяются:

- среднее отношение теплоемкостей в нижней ступени теплообмена ( $m$ ) и высота этой ступени;
- предполагая, что температура шихты в зоне замедленного теплообмена 900 °С, а на выходе из нижней ступени теплообмена температура материала равна средневзвешенной температуре продуктов плавки, определяется температурное поле материала в этой зоне [79, 85];
- высота слоя шихты, в которой располагается зона вязкопластического состояния материалов и возможно протекание реакции прямого восстановления монооксида железа углеродом коксовой насадки, определяется следующим образом:

$$h_{п.в.} = \Delta t_p / \Delta t(h), \quad (3.41)$$

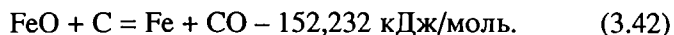
где  $\Delta t(h)$  — градиент температуры на 1 метр высоты слоя шихты;

- объем печи, в котором возможно протекание процесса прямого восстановления ( $V_1$ ).

6. Необходимо определить массу монооксида железа, находящегося в железорудном материале в пределах рассматриваемого слоя и восстанавливающегося прямым путем.

7. Определяются затраты тепла при условии восстановления монооксида железа.

Решение этой задачи связано с протеканием реакции восстановления монооксида железа с углеродом коксовой насадки:



Принимаем допущение, что в первичном шлаке, поступающем в зону вязкопластического состояния железорудных материалов, содержится  $\mu = 0,2$  монооксида железа. При условии пренебрежения содержанием оксидов марганца, фосфора, серы масса железистого шлака на входе в рассматриваемую зону рассчитывается по уравнению

$$Q_{\text{шл}}'' = U_{\text{жрм}}/(1 - \mu). \quad (3.43)$$

Общий выход шлакообразующих из железорудного материала с учетом невосстановленных оксидов железа в области первичного шлакообразования:

$$Q_{\text{шл}} = (\Sigma M_{\text{агл}} + \Sigma M_{\text{ок}} + \Sigma M_{\text{р}}) Q_{\text{шл}}'', \quad (3.44)$$

где  $M_{\text{агл}}$ ,  $M_{\text{ок}}$ ,  $M_{\text{р}}$  — удельные расходы железорудных материалов, кг/т чугуна.

В том числе масса  $\text{FeO}$ :

$$M_{\text{FeO}} = Q_{\text{шл}} \mu. \quad (3.45)$$

Объем этого шлака:

$$V_{\text{шл}} = (0,001 Q_{\text{шл}})/\rho_{\text{шл}}^{\text{FeO}}, \quad (3.46)$$

где  $\rho_{\text{шл}}^{\text{FeO}}$  — плотность железистого шлака, т/м<sup>3</sup>.

Для определения количества монооксида железа в рассчитанном ранее объеме печи, в котором возможно протекание процессов прямого восстановления, необходимо найти долю объема межкусковых пространств коксовой насадки, занимаемую шлаковыми массами. При удельном расходе кокса  $k$  (кг/т чугуна) и насыпной массе кокса  $\gamma_k$  (т/м<sup>3</sup>), удельный объем, занимаемый коксом, рассчитывается по уравнению, м<sup>3</sup>/т чугуна:

$$V_k = (0,001 k)/\gamma_k. \quad (3.47)$$

Объем межкусковых пространств коксовой насадки  $V_{\text{кк.н}}$  при порозности кокса  $\epsilon_k$  будет равен  $V_k \epsilon_k$ , а доля объема коксовой насадки, занимаемая шлаковыми массами  $\beta_k^{\text{шл}}$ , составит  $V_{\text{шл}}/V_k$ .

В этом случае объем шлаковых железистых масс в найденном ранее объеме доменной печи, в котором протекают процессы прямого восстановления оксидов железа, составит  $V_1 \beta_k^{\text{шл}}$ . Масса шлакового расплава:

$$M_{\text{шл}} = V_{\text{шл}}^{\text{FeO}} \rho_{\text{шл}}^{\text{FeO}}. \quad (3.48)$$

Масса монооксида железа в этом шлаке, т:

$$M_{\text{шл}}^{\text{FeO}} = M_{\text{шл}}(M_{\text{FeO}}/Q_{\text{шл}}). \quad (3.49)$$

Далее возможно определение затрат тепла, необходимого для компенсации отрицательного теплового эффекта реакции взаимодействия монооксида железа с углеродом коксовой насадки.

Рассмотрим сначала затраты тепла при стационарных условиях восстановления монооксида железа, когда восстановление осуществляется практически мгновенно, а затем рассмотрим и динамический режим.

#### Стационарный режим

Затраты тепла, требующие компенсации в послепусковой период после остановки доменной печи при термодинамических условиях, МДж:

$$Q_1 = M_{\text{шл}}^{\text{FeO}} 10^3 152,232/72. \quad (3.50)$$

Исходные данные и результаты расчетов применительно к условиям работы доменной печи № 9 объемом 2014 м<sup>3</sup> ОАО ММК представлены в табл. 3.11.

#### Динамический режим

Для решения этой задачи необходимо знание особенностей фильтрации шлаковых железистых расплавов через слой раскаленного кокса и связи их с физико-химическими процессами, происходящими в рассматриваемой зоне печи. При этом закономерности восстановления монооксида железа на коксовых насадках значительно отличается от таковых на отдельном куске графита, помещенном в большом объеме расплава, что делает проблематичным использование этих данных.

Высокие температуры и наложение процессов восстановления на фильтрацию делают экспериментальные исследования даже в лабораторных условиях весьма трудоемкими, что, по-видимому, явилось одной из основных причин, по которой сведения по гидродинамике и восстановлению железистого расплава применительно к условиям доменной плавки весьма и весьма скудны.

Среди этих данных следует особо выделить результаты уникальных экспериментальных исследований, выполненных под

Таблица 3.11

**Исходные данные и результаты расчетов параметров зоны  
вязкопластического состояния железорудных материалов**

Показатель	Значение параметра
Расход, кг/т чугуна:	
местного агломерата	851,3
окатышей ССГОК	775,6
окатышей ЛеБГОК	102,6
кокса	427,0
Содержание $O_2$ , %	26,8
Температура, °C	1120
Расход природного газа, $m^3/ч$	109
Состав чугуна, %:	
Si	0,55
Mn	0,20
S	0,016
P	0,025
Основность шлака, $CaO/SiO_2$	1,11
$U_{жрм}$ , кг/кг чугуна	0,169
Средневзвешенные температуры, °C:	
$T_{п.пл}$	1175
$T_{к.пл}$	1298
$T_p$	1420
$\Delta T_{вп}$	122
$\Delta T_{кп}$ , °C/ч	2,0
Площадь сечения насадки $S$ , $m^2$	78,1
Высоты, м:	
$H_{пз}$	7,1
$h_{п.з}$	1,35
Объем зоны шлака $V_1$ , $m^3$	111,0
$\beta_{шл}^*$ , $m^3/m^3$	0,144
$M_{шл}$ , т	45
$M_{шл}^{FeO}$ , т	9,0
$g_c$ , кДж/кг	4513,0

руководством проф. С.В. Шаврина сотрудниками Института металлургии УрО РАН [88, 154, 155].

В результате лабораторных исследований получено уравнение, привязывающее скорость восстановления монооксида железа, оцениваемой величиной потока газа (м/с), образующегося в слое на единицу сечения насадки (м<sup>2</sup>), применительно к условиям доменной плавки, которое имеет следующий вид<sup>1</sup>:

$$V = 2,82 \cdot 10^{-2}(1 + d^{-2})T^2\rho_{\text{шл}}^2DC^2 \text{ или } V = kC^2, \quad (3.51)$$

где  $V$  — величина потока газа СО, образующегося в результате восстановления монооксида железа на коксовой насадке на единицу сечения насадки в единицу времени (м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·с);

$d$  — диаметр куска кокса, см;

$T$  — температура в слое, К;

$\rho_{\text{шл}}$  — плотность шлака, г/см<sup>3</sup>;

$D$  — коэффициент диффузии, см<sup>2</sup>/с;

$C$  — концентрация в шлаке FeO, доли.

$$k = 2,82 \cdot 10^{-2}(1 + d^{-2})T^2\rho_{\text{шл}}^2D. \quad (3.52)$$

Результаты прямых измерений на доменных печах ОАО ММК температуры в горне печи во время остановок указывают на незначительное ее уменьшение (не более 2 °С/ч) [150], поэтому в дальнейших расчетах принимаем, что  $T = 0,5(t_{\text{н.п}}^{\text{н.п}} + T_{\text{р}})$ . При учете того, что масса железистого шлака в рассматриваемой зоне составляет  $M_{\text{шл}} = 45$  т, а площадь сечения насадки  $S = 78,1$  м<sup>2</sup>, газовыделение в виде СО составит  $(45 \cdot 1000 \cdot C \cdot 22,4)/(72 \cdot 78,1) = 179,3 \times C$  (м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> сечения печи) массы монооксида железа в слое, кг.

Тогда уравнение кинетики восстановления монооксида железа из расплава на коксовой насадке примет следующий вид:

$$-179,3(dC/d\tau) = kC^2 \quad (3.53)$$

или применительно к нижней зоне доменной печи

$$-dC/C^2 = 0,00362d\tau. \quad (3.54)$$

После интегрирования уравнения (3.54) имеем

$$(1/C_{\text{кон}} - 1/C_0) = 36,2 \cdot 10^{-4}\tau_{\text{вос}}, \quad (3.55)$$

<sup>1</sup>Ипатов В.Б. Некоторые особенности фильтрации шлаковых расплавов через коксовые насадки: диссертация канд. техн. наук. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1971. 145 с.

где  $C_{\text{кон}}$  — конечная концентрация монооксида железа в шлаке в рассматриваемой зоне в момент времени  $\tau_{\text{вос}}$ , с, мас.доли;

$C_0$  — начальная концентрация (при  $\tau = 0$ ) монооксида железа в шлаке на входе в рассматриваемую зону, мас. доли.

Из уравнения (3.55) получаем изменение во времени  $\tau_c$  массы монооксида железа, восстанавливаемого прямым путем:

$$\Delta M_{\text{шл}}^{\text{FeO}} = M_{\text{шл}}(C_0 - C), \quad (3.56)$$

где  $C = 1/[1/C_0 + 36,2 \cdot 10^{-4}\tau_c]$ .

Выполненный ранее анализ предполагает: изменение концентрации FeO в расплаве небольшое, и можно принять, что масса расплава остается постоянной. Если же восстановление FeO и выделение Fe из расплава приводят к заметному уменьшению его массы, то это необходимо учитывать в расчетах. Выполним этот анализ.

Значение текущей массы шлака  $M_{\text{шл}}^{\tau}$  в процессе восстановления из него FeO и перехода Fe в чугун рассчитывается по уравнению

$$M_{\text{шл}}^{\tau} = M_{\text{шл}}(1 - C_0)/(1 - C), \quad (3.57)$$

где  $M_{\text{шл}}$  — начальная масса шлака в рассматриваемом слое печи, т.

Подставив  $M_{\text{шл}}^{\tau}$  из уравнения (3.57) в уравнение (3.56), имеем

$$\begin{aligned} [45 \cdot 1000(1 - C_0)C/22,4]/[(1 - C)72 \cdot 78,1] = \\ = 179,3(1 - C_0)C/(1 - C), \end{aligned} \quad (3.58)$$

где  $45 \cdot 1000(1 - C_0)C/(1 - C)$  — текущая масса FeO в слое, кг.

В этом случае уравнение восстановления примет следующий вид:

$$-179,3(1 - C_0)/(1 - C)(dC/d\tau) = kC^2 \text{ или} \quad (3.59)$$

$$-dC/[(1 - C)C^2] = [0,00362/(1 - C_0)]d\tau. \quad (3.60)$$

После интегрирования последнего уравнения имеем

$$\begin{aligned} (1 - C_0)\{1/C_{\text{кон}} - 1/C_0 + \ln[(1 - C_{\text{кон}})/C_{\text{кон}}] - \ln[(1 - C_0)/C_0]\} = \\ = 36,2 \cdot 10^{-4}\tau_{\text{вос}}. \end{aligned} \quad (3.61)$$



Результаты расчетов  $\tau_{\text{вос}}$  по формулам (3.55) и (3.61) при различных значениях  $C_{\text{кон}}$  и  $C_0 = 0,2$  (20 %) представлены в табл. 3.12.

Таким образом, учет изменения массы шлака уменьшает длительность восстановления монооксида железа на 15—20 %.

Решение уравнения (3.61) относительно текущего значения  $C$  аналитически нецелесообразно в силу его громоздкости и сложности. В то же время численное решение этого уравнения любым из имеющихся пакетов не вызывает каких-либо затруднений. При известном значении  $C$  легко по уравнению (3.57) определяется текущее значение выхода шлака  $M_{\text{шл}}$  и изменение во времени  $\tau_c$  массы монооксида железа  $\Delta M_{\text{шл}}^{\text{FeO}}$ , восстанавливаемого прямым путем. В итоге определяется первая статья потерь тепла на стоянке доменной печи, т:

$$\Delta M_{\text{шл}}^{\text{FeO}} = M_{\text{шл}} C_0 - M_{\text{шл}} C. \quad (3.62)$$

Таким образом, затраты тепла, требующие компенсации, МДж:

$$Q_1 = \Delta M_{\text{шл}}^{\text{FeO}} 10^3 152,2 / 72. \quad (3.63)$$

#### Унос тепла с отходящими из печи газами

Второй статьей потерь тепла в период остановки печи является унос тепла с удаляемыми из доменной печи газами. Объем удаляемых из печи газов, получающихся в процессе взаимодействия монооксида железа с углеродом кокса, определяется по известной уже реакции:

$$V_r = (\Delta M_{\text{шл}}^{\text{FeO}} 22,4) / 72. \quad (3.64)$$

Теплоемкость двуатомных газов (в данном случае монооксида углерода — CO) может быть определена следующим образом:

$$c_0 = 1,2897 + 0,000121 t_r. \quad (3.65)$$

Таблица 3.12  
Динамика восстановления монооксида углерода на коксовой насадке

$C_{\text{кон}}$ , масс. доли	$\tau_{\text{вос}}$ , ч	$\tau_{\text{вос}}^*$ , ч
0,05	1,15	1,02
0,03	2,17	1,87
0,02	3,45	2,92

\*С учетом изменения массы расплава.

Таблица 3.13

**Результаты расчетов затрат тепла на реакции восстановления монооксида железа и потерь тепла с отходящими газами**

Параметр	$\tau_c$ , мин							
	15	45	30	60	75	90	105	120
$C$ , доли	0,121	0,068	0,087	0,0555	0,0470	0,041	0,036	0,032
$\Delta M_{\text{шл}}^{\text{FeO}}$ , т	3,56	5,94	5,09	6,503	6,885	7,155	7,38	7,56
$Q_1$ , МДж	7526	12557	10760	13747	14555	15126	15601	15982
$Q_2$ , МДж	2039	3402	2916	3725	3944	4098	4227	4296
$C^*$ , доли	0,118	0,0629	0,0825	0,0506	0,0423	0,0363	0,0318	0,0282
$\Delta M_{\text{шл}}^{\text{FeO}}$ , т	4,18	6,58	5,76	7,08	7,41	7,64	7,82	7,96
$Q_1^*$ , МДж	8845	13920	12184	14972	15667	16162	16529	16820
$Q_2^*$ , МДж	2397	3771	3301	4056	4244	4378	4478	4557

\*С учетом изменения массы расплава.

Принимаем температуру отходящего из рассматриваемой зоны печи газа по уравнению  $t_r = (T_{\text{н.пл}} + 100)$ .

В этом случае количество теплоты, уносимой из печи газом:

$$Q_2 = V_r c_0 t_r. \quad (3.66)$$

Результаты расчетов статей  $Q_1$  и  $Q_2$  с учетом кинетики процессов восстановления монооксида железа приведены в табл. 3.13.

Тепловые потери печи в период остановки печи с охлаждающей водой и в окружающее пространство

Наконец, третья, заключительная статья потерь тепла в процессе остановки печи связана с уносом тепла с охлаждающей водой и в окружающее пространство.

Предварительно определяется теплосодержание (запас тепла) зоны вязкопластического состояния материалов перед остановкой печи. При этом делается допущение, что слой состоит только из коксовой насадки. Учет наличия расплава, как показывают расчеты, не вносит существенной погрешности в результаты. При необходимости в дальнейшем можно будет учесть и это обстоятельство.

Средняя температура зоны вязкопластического состояния материалов:

$$T = 0,5(t_{\text{н}}^{\text{п.в}} + T_{\text{р}}). \quad (3.67)$$

Принимаем линейную зависимость теплоемкости кокса от температуры по справочным данным, кДж/кг:

$$C_{\text{к}} = a + bT. \quad (3.68)$$

Тогда теплосодержание зоны вязкопластического состояния материалов перед остановкой печи, кДж:

$$I_0 = V_1 \gamma_{\text{к}} 1000 C_{\text{к}} T = V_1 \gamma_{\text{к}} 1000 (a + bT) T, \quad (3.69)$$

где  $V_1$  — объем зоны вязкопластического состояния материалов.

Прямыми измерениями на доменных печах ОАО ММК установлено<sup>1</sup>, что скорость снижения температуры коксовой насадки остановленной доменной печи на расстоянии 1,0—1,2 м от среза фурмы составляет 2,0—2,2 °С/ч. Предполагаем, что снижение температуры составляет 2,0 °С/ч и обусловлено именно потерями тепла в окружающее пространство, поскольку осуществлялось измерение температуры кокса за фурмой, т. е. на границе зоны вязкопластического состояния материалов. Изменение же температуры в пределах самой зоны вязкопластического состояния материалов неизвестно, его можно определить расчетным путем.

Тогда теплосодержание зоны вязкопластического состояния материалов по ходу стоянки печи, кДж:

$$I_{\tau} = V_1 \gamma_{\text{к}} 1000 [a + b(T - 2\tau/60)](T - 2\tau/60), \quad (3.70)$$

где  $\tau$  — время стоянки печи, мин.

Изменение теплосодержания зоны вязкопластического состояния материалов по ходу стоянки печи, обусловленное потерями тепла через футеровку:

$$Q_{3,\tau} = \Delta I_{\tau} = I_0 - I_{\tau} = V_1 \gamma_{\text{к}} 1000 \{ (a + bT)T - [(a + b(T - 2\tau/60))(T - 2\tau/60)] \}. \quad (3.71)$$

<sup>1</sup>Терентьев В.Л. Разработка технологии доменной плавки на коксе, полученном с использованием нефтекоксовой мелочи в угольной шихте: Автореф. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2000. 21 с.

Таблица 3.14

Изменение тепловых потерь ( $Q_3$ ) по ходу стоянки печи

Параметр	$\tau_c, \text{ч}$							
	0,5	1,0	1,5	2,0	6,0	12,0	24,0	48,0
$Q_3$ , МДж	257	514	771	1171	3100	6100	12155	23923
$Q_3^*$ , МДж	321	643	964	1348	3875	7625	15194	29904

Примечание. Падение температуры 2,0 °С/ч; \* падение температуры 2,5 °С/ч.

Расчет  $Q_3$  при различной длительности стоянки печи представлен в табл. 3.14.

Суммарные потери тепла в зоне вязкопластического состояния материалов в период остановки печи

Суммарные потери тепла в период остановки печи в общем виде представляются в следующем виде:

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (3.72)$$

Результаты расчетов приведены в табл. 3.15.

Определим возможное падение температуры в зоне вязкопластического состояния материалов  $\Delta T_i(\tau_c)$  за счет составляющих  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  и  $Q_{\Sigma}$  при отсутствии корректировки теплового режима.

$$\Delta T_i(\tau_c) = Q_i/Q_3 \Delta T_1(\tau_c), \quad (3.73)$$

где  $\Delta T_i(\tau_c)$  — падение температуры по ходу стоянки по данным экспериментальных измерений. Результаты расчетов представлены в табл. 3.16.

Расчет расхода кокса, необходимого для компенсации потерь тепла на остановках

Необходимый расход углерода кокса для компенсации потерь тепла в период остановки доменной печи можно найти из уравнения теплового баланса рассматриваемой зоны:

$$C = Q_{\Sigma}/g_c, \quad (3.74)$$

Таблица 3.15

Суммарные потери тепла при различной продолжительности стоянки печи

Параметр	$\tau$ , час								
	0,5	1,0	1,5	2,0	6,0	12,0	24,0	48,0	72,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q_1$ , МДж	12184	14972	16162	16820	19030	19030	19030	19030	19030
$Q_2$ , МДж	3301	4056	4378	4557	5160	5160	5160	5160	5160
$Q_3$ , МДж	257	514	771	1078	3100	6100	12155	23923	35305
$Q_{\Sigma}$ , МДж	15742	19542	21311	22455	27290	30290	36345	48113	59495
$Q_1$ , %	77,4	76,6	75,8	74,9	69,7	62,8	52,4	39,6	32,0
$Q_2$ , %	21,0	20,8	20,5	20,3	18,9	17,0	14,2	10,7	8,7
$Q_3$ , %	1,6	2,6	3,7	4,8	11,4	20,2	33,4	49,7	59,3
$Q_1^*$ , МДж	12184	14972	16162	16820	19030	19030	19030	19030	19030
$Q_2^*$ , МДж	3301	4056	4378	4557	5160	5160	5160	5160	5160
$Q_3^*$ , МДж	321	643	964	1348	3875	7625	15194	29904	44131
$Q_{\Sigma}^*$ , МДж	15808	19671	21504	22725	28065	31815	39384	54094	68321
$Q_1^*$ , %	77,0	76,1	75,2	74,0	67,8	59,8	48,3	35,2	27,8
$Q_2^*$ , %	21,0	20,6	20,4	20,0	18,4	16,2	13,1	9,5	7,6
$Q_3^*$ , %	2,0	4,3	4,5	5,9	13,8	24,0	38,6	55,3	64,6

Таблица 3.16

Эквивалентное падение температуры в зоне вязкопластического состояния материалов, °С

Параметр	$\tau$ , ч								
	0,5	1,0	1,5	2,0	6,0	12,0	24,0	48,0	72,0
За счет $Q_1$	47,4	58,3	62,9	64,2	73,7	74,8	75,1	76,4	77,6
За счет $Q_2$	12,8	15,8	17,0	17,1	20,0	20,3	20,5	20,8	21,2
За счет $Q_3$	1,0	2,0	3,0	4,0	12,0	24,0	48,0	96,0	144,0
Итого (за счет $Q_{\Sigma}$ )	61,2	76,1	82,9	85,7	105,7	119,1	143,6	191,4	242,8
За счет $Q_1^*$	47,4	58,2	62,9	64,2	73,7	74,8	75,2	76,4	77,6
За счет $Q_2^*$	12,9	15,8	17,0	16,9	20,0	20,3	20,4	20,7	21,0
За счет $Q_3^*$	1,25	2,5	3,75	5,0	15,0	30,0	60,0	120,0	180,0
Итого (за счет $Q_{\Sigma}^*$ )	61,6	76,5	83,7	86,2	108,7	125,1	145,7	217,1	278,6

Примечание. При градиенте температур 2,0 °С/ч; \* при градиенте температур 2,5 °С/ч.

где  $C$  — расход углерода кокса для компенсации потерь тепла в период остановки доменной печи, кг;

$g_c$  — теплоотдача кокса, кДж/кг.

Значение теплоотдачи кокса рассчитывается по уравнению

$$g_c = \{9805 + V_d^\Sigma[(c_0 + 0,00124fc_{H_2O})t_d - 10810 \cdot 0,00124f] - V_{\Gamma}'c_0t_r\}, \quad (3.75)$$

где  $V_d^\Sigma$  — расход дутья, м<sup>3</sup>/кг  $C_\Phi$ ;

$V_{\Gamma}'$  — выход горнового газа, м<sup>3</sup>/кг  $C_\Phi$ ;

$t_r$  — температура газа, покидающая рассматриваемую зону, °С.

Расход дутья в расчете на 1 кг углерода кокса, сгорающего у фурм ( $C_\Phi$ ), определяется из уравнения

$$V_d' = 0,9333/(0,01\omega + 0,00062f). \quad (3.76)$$

Расход дутья, необходимого для конверсии 1 м<sup>3</sup> природного газа:

$$V_d'' = 0,5/(0,01\omega + 0,00062f). \quad (3.77)$$

Расход природного газа в расчете на 1 кг углерода кокса, сгорающего у фурм:

$$\sigma = Q_{\text{пр}}/C_\Phi. \quad (3.78)$$

Суммарный расход дутья в расчете на 1 кг углерода кокса, сгорающего у фурм:

$$V_d^\Sigma = V_d' + \sigma V_d''. \quad (3.79)$$

Выход колошникового газа в расчете на 1 кг углерода кокса, сгорающего у фурм, определяется из уравнения

$$V_{\text{кг}}' = (V_{\text{кг}}/V_d) V_d^\Sigma. \quad (3.80)$$

После расчета всех величин, определяющих расход углерода ( $C$ ) на компенсацию потерь тепла в период стоянки печи, возможно определение корректировочного расхода кокса:

$$k_k = Q_\Sigma/(0,01g_c C_{\text{нел}}), \quad (3.81)$$

где  $C_{\text{нел}}$  — содержание нелетучего углерода в коксе, % (принимая  $C_{\text{нел}} = 86,46\%$ ).

Таблица 3.17

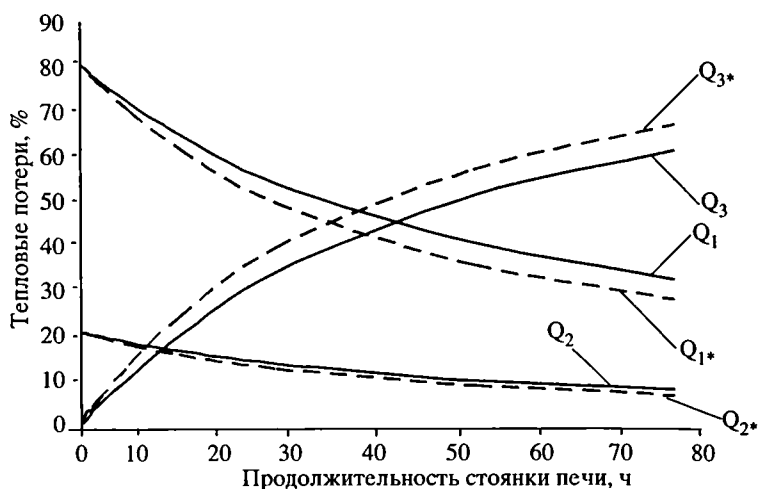
**Результаты расчетов расхода кокса при различной продолжительности  
стоянки печи**

Параметр	$\tau_c, \text{ч}$								
	0,5	1,0	1,5	2,0	6,0	12,0	24,0	48,0	72
$Q_{\Sigma}$ , МДж	15742	19542	21311	22455	27290	30290	36345	48113	59495
$k_k$ , кг	4035	5009	5462	5755	6995	7764	9316	12332	15249
$Q_{\Sigma}^*$ , МДж	15808	19671	21504	22725	28065	31815	39384	54094	68321
$k_k^*$ , кг	4052	5042	5512	5825	7193	8155	10095	13865	17511

*Примечание.* С учетом изменения массы шлака при градиенте температур  $2,0 \text{ }^{\circ}\text{C/ч}$ ; \* при градиенте температур  $2,5 \text{ }^{\circ}\text{C/ч}$ .

Результаты расчетов расхода кокса при различной продолжительности стоянки печи приведены в табл. 3.17.

Полученные результаты не противоречат практике корректировки расхода кокса при остановках печей и существующим физическим представлениям о протекании тепломассообменных процессов в доменной печи. Расчеты показывают (рис. 3.21), что



**Рис. 3.21. Изменение составляющих потерь тепла во время стоянки  
доменной печи**

все составляющие тепловых потерь существенны. Превалирующее влияние затрат на протекание эндотермической реакции восстановления монооксида железа, находящегося в вязкопластическом состоянии, и потерь тепла с газами, удаляемыми из рассматриваемой зоны доменной печи, т. е. физико-химическими процессами, наблюдается в течение всей длительности остановок. При стоянках продолжительность более 1,5—2 суток потери тепла в зоне вязкопластического состояния материалов определяются в большей степени потоком тепла через футеровку в окружающее пространство. Модель можно использовать как элемент компьютерной системы поддержки принятия решений при остановке доменной печи [160].

### *Характеристика программного обеспечения*

Пакет программ «Корректировка теплового режима доменной печи на остановках» выполняет следующие функции:

- расчет нестационарных процессов тепловой работы доменной печи перед остановкой печи и в послепусковой период при наличии различного рода воздействий:
  - рудной нагрузки;
  - расхода горячего дутья;
  - расхода природного газа;
  - содержания кислорода в дутье;
  - влажности дутья;
  - температуры дутья;
- расчет потерь тепла во время стоянки печи;
- расчет величины управляющего воздействия (рудной нагрузки), которое необходимо осуществить, чтобы получить заданное содержание кремния в чугуне в послепусковой период;
- расчет интервала времени до остановки печи, за который необходимо осуществить управляющее воздействие для получения заданного содержания кремния в чугуне в послепусковой период;
- визуальное отображение результатов расчетов в виде графиков и диаграмм.

В качестве средства разработки использована среда программирования Delphi 6. Общий алгоритм работы программы (рис. 3.22) представляет собой последовательные операции ввода параметров, моделирования процессов в предостановочный период, во время стоянки печи и в послеостановочный период, а



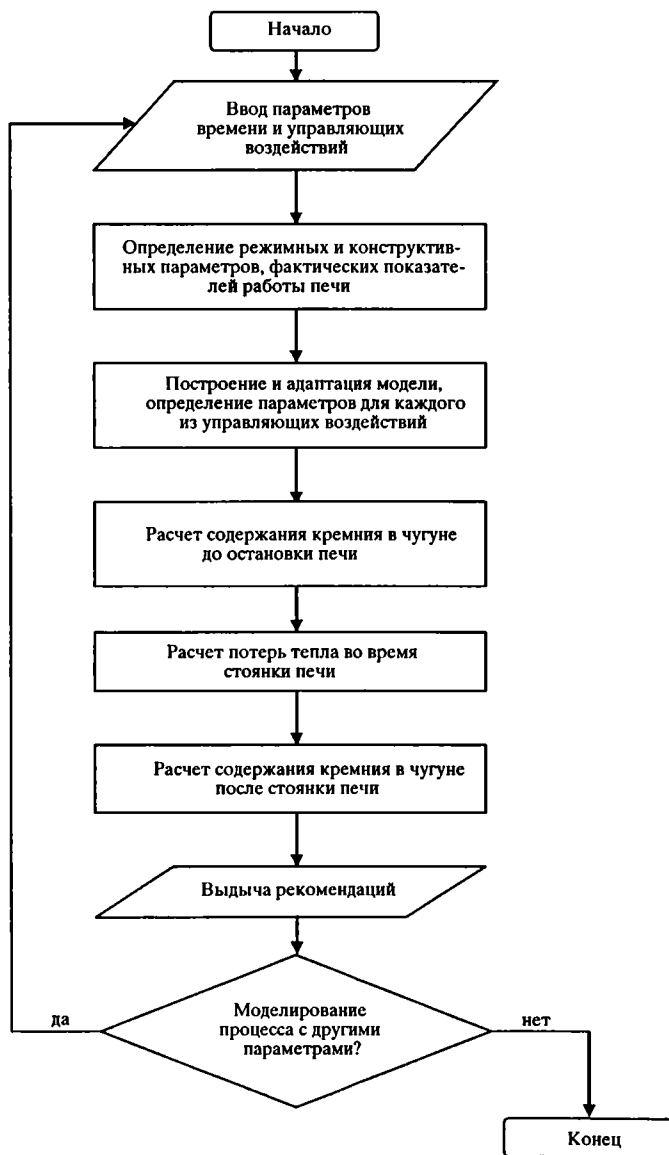


Рис. 3.22. Блок-схема алгоритма корректировки теплового режима доменной печи на остановках

также выдачи рекомендаций. Меню программы расположено в верхней части (сразу под заголовком окна) и представляет средства доступа к основным возможностям программы.

Краткое описание пунктов меню:

- *Файл* — содержит только один пункт «Выход», позволяющий завершить работу программы.
- *Правка* — позволяет выполнять операции копирования в буфер обмена и вставки из него текстовой и числовой информации.
- *Настройка* — позволяет пользователю ввести или отредактировать параметры модели, а также задать управляющие воздействия и время осуществления этих воздействий.
- *Моделирование* — содержит два пункта — моделирование нестационарных процессов в предостановочный и послезадувочный периоды.
- *Тренды* — выводит на экран графическое представление исследуемых зависимостей.
- *Сервис* — содержит один пункт «Блокировать систему», который позволяет ограничить доступ к информации не санкционированных пользователей.
- *Окно* — задает порядок расположения дочерних окон внутри главного окна программы.
- *Помощь* — содержит пункт, вызывающий справочную систему.

### 3.5. Оптимальное управление топливно-энергетическими ресурсами доменного цеха

В настоящее время каждому металлургическому предприятию приходится самостоятельно решать вопросы оптимизации состава шихты, в том числе и по экономическим критериям, оценивать рациональность использования различных добавок к дутью, определять стратегию управления комплексом доменных печей и дальнейшего совершенствования доменной технологии. С другой стороны, менее стабильные внешние условия плавки приводят все чаще к значительным отклонениям текущих технологических режимов работы доменных печей от оптимальных. Поэтому в современных условиях резко возросла потребность в использовании автоматизированных систем комплексной оптимизации условий работы доменных печей и методов оперативного управления технологическим режимом доменной плавки [14, 16—20, 112, 145].

Наличие многих факторов и критериев, определяющих эффективность использования комбинированного дутья, а также ограничений на расходы топливно-энергетических ресурсов существенно усложняет задачу по определению оптимальных параметров дутья, при которых достигаются наилучшие технико-экономические показатели группы доменных печей или цеха в целом. Решение задач подобного типа обычно осуществляется с применением методов математического моделирования и математического программирования, которые широко используются в энергетике, химической технологии, металлургической теплотехнике. Особое внимание в связи с этим заслуживают работы, выполненные под руководством В.В. Кафарова [161, 193], Х.Н. Гизатуллина [162], В.Г. Лисиенко [163—165], И.С. Соломахины [166, 173] и др. Экономико-математические модели, которые предлагаются в настоящее время для этих целей, еще недостаточно полно отражают всю совокупность условий. Этим, по-видимому, объясняется весьма сдержанное отношение к ним специалистов черной металлургии. Еще меньший прогресс наблюдается в области моделирования и оптимизации топливоиспользования в доменном производстве, хотя актуальность этих разработок не вызывает сомнений и для их развития имеются определенные предпосылки.

Оптимальное распределение топливно-энергетических ресурсов, в частности инжектируемого топлива, в пределах группы доменных печей является актуальной задачей, поскольку технологические показатели работы отдельных печей существенно различаются. При заданном на доменный цех общем расходе инжектируемого топлива целесообразно иметь оперативную методику оценки эффективности использования указанных ресурсов на доменных печах и осуществлять их оптимальное распределение. Эта задача актуальна для крупных доменных цехов, включающих до 8—10 доменных печей, выплавляющих в сутки до 30 тыс. тонн чугуна, для чего используется около 45 тыс. тонн железорудного сырья, 13 тыс. тонн кокса, 3,5 млн м<sup>3</sup> технологического кислорода, до 4,0 млн м<sup>3</sup> природного газа. Эффективность применения комбинированного дутья определяется факторами теплоэнергетического, технологического, экономического характера и внешними условиями. Наличие многих факторов и критериев, определяющих эффективность использования комбинированного дутья, а также ограничений на расходы топливно-энергетических ресурсов существенно усложняет задачу по

определению оптимальных параметров дутья, при которых достигаются наилучшие технико-экономические показатели работы как отдельных доменных печей, так и группы печей или цеха в целом. При построении оптимизационных моделей необходимо учитывать дополнительные ограничения, которые могут возникать в периоды осенне-зимних похолоданий, когда из-за падения давления в заводском газопроводе нет возможностей подать природный газ в доменную печь или, наоборот, появляются «излишки» природного газа. Поэтому необходимо иметь формализованные и запланированные приемы надежного и маневренного перераспределения топливно-энергетических ресурсов. Решить эту задачу можно только на основе широкого использования современных методов математического моделирования и разработок на этой основе автоматизированных систем оптимизации распределения энергоресурсов [167—173].

В дальнейшем будем рассматривать задачу стратегического распределения параметров комбинированного дутья в группе доменных печей. В связи с этим предметом рассмотрения будут являться только статические оптимизационные модели, т. е. закономерности динамики комплекса доменных печей не учитываются. Последнее обусловлено тем, что перераспределение параметров комбинированного дутья осуществляется по мере необходимости, но, как правило, периодичность усреднения информации составляет чаще всего 7 суток.

При постановке и решении задач оптимизации распределения топливно-энергетических ресурсов требуется не только изучение статических характеристик, описывающих влияние изменений условий плавки на технико-экономические показатели работы печей, но и выполнение детального анализа для математического описания как внешних, так и внутренних ограничений. Кроме того, на практике приходится оценивать техническое состояние печи и оборудования, объем расходов природного газа, качество сырья и другие факторы, которые учитываются только методом экспертных оценок. Поскольку общее количество топливно-энергетических ресурсов (мощность источников) задано, то эти рекомендации должны учитывать и общий лимит ресурсов, выделяемый цеху.

При оптимизации распределения комбинированного дутья в группе доменных печей, как правило, необходимо определять индивидуальные эквиваленты замены кокса для всех доменных печей, входящих в рассматриваемую группу. Для этого использу-

ют различные подходы для определения эквивалента замены, в частности кинетико-математическую модель [88, 92, 99, 105], баланс тепла для печи в целом или отдельных ее зон [11, 66], комплексный критерий протекания теплообменных, восстановительных, газогидродинамических процессов [25, 79, 85], экспериментальные данные по эффективности вдувания топлива в доменные печи [174, 175] и др. Решение задач оптимизации параметров комбинированного дутья между печами доменного цеха по различным критериям с целью рационального распределения топливно-энергетических ресурсов рассмотрено в работах А.А. Андропова [176], А.В. Бородулина [162], Ю.Н. Овчинникова [177, 178], И.Г. Товаровского [11, 179], С.В. Шаврина и А.В. Ченцова [180, 181], Б.П. Довгалюка [182, 183], Чугель В.Р. [189] и других.

Формулировка общей постановки и решения задачи оптимального распределения нескольких потоков видов сырья, топлива для параллельно работающих агрегатов, к которым можно отнести и доменные печи, дана в работах [153, 161, 167, 193]. Эта задача служит иллюстрацией более общего класса задач о распределении ограниченного количества ресурсов между несколькими потребителями. При этом суммарный расход топливно-энергетических ресурсов, сырья по группе агрегатов должен быть равен заданному значению, т. е. учитываются ограничения типа строгого равенства. Это позволяет использовать для решения задачи метод множителей Лагранжа. При этом зависимость целевой функции и ограничений от параметров состояния (расходов топливно-энергетических ресурсов, сырья и т. п.) сможет иметь в общем случае нелинейный вид. В результате решения такой задачи оптимизации авторами работы сделан важный вывод: при оптимальном распределении потоков сырья производные от критериев оптимальности всех процессов (агрегатов), на которые это сырье распределяется, должны быть равны между собой. Этот вывод представляет практический интерес и может в ряде случаев быть использован для организации управления и планирования производства.

Применение этого вывода к доменному производству позволили И.Г. Товаровскому [11, 179] и А.В. Бородулину [162] показать, что наибольшая экономия кокса в группе печей (или наименьший перерасход его в случае отрицательного влияния того или иного ресурса) будет при таком распределении этого ресурса, когда небольшое его изменение на каждой из печей вызыва-

ет одинаковое изменение расхода кокса на всех печах. Действительно, если распределять ресурс иначе, то на печах с меньшей экономией кокса на единицу дополнительного ресурса можно его уменьшить, увеличив на такую же величину на печах с большей величиной экономии и получив общую экономию кокса по группе печей. Очевидно, что сущность постановки и решения задачи не изменяется при выборе в качестве критерия оптимизации не расхода кокса, а любого другого критерия, например производительности, экономичности и т. п.

Такой подход применим к распределению любого ограниченного ресурса (различные виды сырья и кокса, дутьевые добавки, нагрев дутья и т. п.), а также оптимизации дутьевого, шлакового режимов и других режимных параметров печей по критерию наилучшего результата для всей группы печей.

Как уже отмечалось, такая постановка и используемый метод решения задач оптимизации не позволяют определять наилучшие параметры комбинированного дутья на каждой из печей цеха в случаях изменения объема ресурсов, выделенных цеху, остановки печей, а также оценивать максимальные значения этих ресурсов, которые может эффективно использовать цех. В предложенных методах не учитываются, как правило, индивидуальные для каждой из печей цеха ограничения на тепловую, газодинамический и шлаковый режимы плавки, нарушения которых возможны при выполнении рекомендаций по распределению ресурсов. В качестве математического аппарата решения задач оптимизации используется метод множителей Лагранжа, который обычно применяется в случае ограничений типа строгого равенства. Учет же ограничений типа «больше» и «меньше», что неизбежно при учете фактических ситуаций, значительно усложняет решение этим методом.

Учитывая сказанное, авторы использовали другой подход, который дает возможность свести к минимуму указанные недостатки.

Этот подход базируется на следующих положениях: в случае чрезвычайной сложности исходной задачи, необходимости учета большого числа нелинейных ограничений типа неравенств, при относительно небольших колебаниях параметров относительно базовых значений целесообразно использовать принцип малых отклонений и свести задачу оптимизации к линейному математическому программированию. При таком подходе имеется возможность в исходной постановке в значительно большей степе-

ни учесть технологические особенности функционирования каждого агрегата в отдельности, однако при этом необходимо оценить погрешности линеаризации модели оптимизируемой системы.

Постановка задачи оптимального распределения природного газа в группе доменных печей проиллюстрирована на рис. 3.23. Последовательность решения задачи оптимизации распределения природного газа отражена в схеме рис. 3.24, где очевидны назначение и функции отдельных этапов.

Особенность решения сложных задач математического программирования связана с тем, что в процессе решения могут возникнуть такие случаи, когда ограничения, наложенные на работу цеха в целом, или технологические ограничения на работу отдельных печей противоречивы, т. е. отсутствует область допустимых решений. В связи с этим в алгоритме решения предусмотрен этап анализа решения задачи. В случае отсутствия области решения задачи и противоречивости условий приходится воспользоваться этапом коррекции, т. е. оценить корректность ограничений, надежность исходной информации и т. д.

В связи с этим важным этапом решения задачи является формирование технологических ограничений на работу каждой из печей цеха, предусматривающих учет и математическое описание ограничений на тепловой, дутьевой, газодинамический и шлаковый режимы плавки при выполнении рекомендаций по распределению природного газа. Оценим возможность использования линеаризованных оптимизационных моделей для решения задач распределения природного газа. Применение для решения задачи оптимизации метода линейного программирования связано, в конечном счете, с составлением и решением уравнения следующего типа [184]:

$$\Delta Y_{AB} = \Sigma(K_i(X_i^B - X_i^A)), \quad (3.82)$$

где  $\Delta Y_{AB}$  — изменение показателя процесса в период  $B$  относительно периода  $A$ ;

$K_i$  — коэффициент пересчета показателя процесса для  $i$ -го режимного параметра;  $X_i^B, X_i^A$  — значения  $i$ -го технологического параметра в периоды  $A$  и  $B$ .

При этом коэффициенты пересчета показателей плавки во всем диапазоне изменения режимных параметров ( $X_i^B - X_i^A$ ) принимают постоянными.

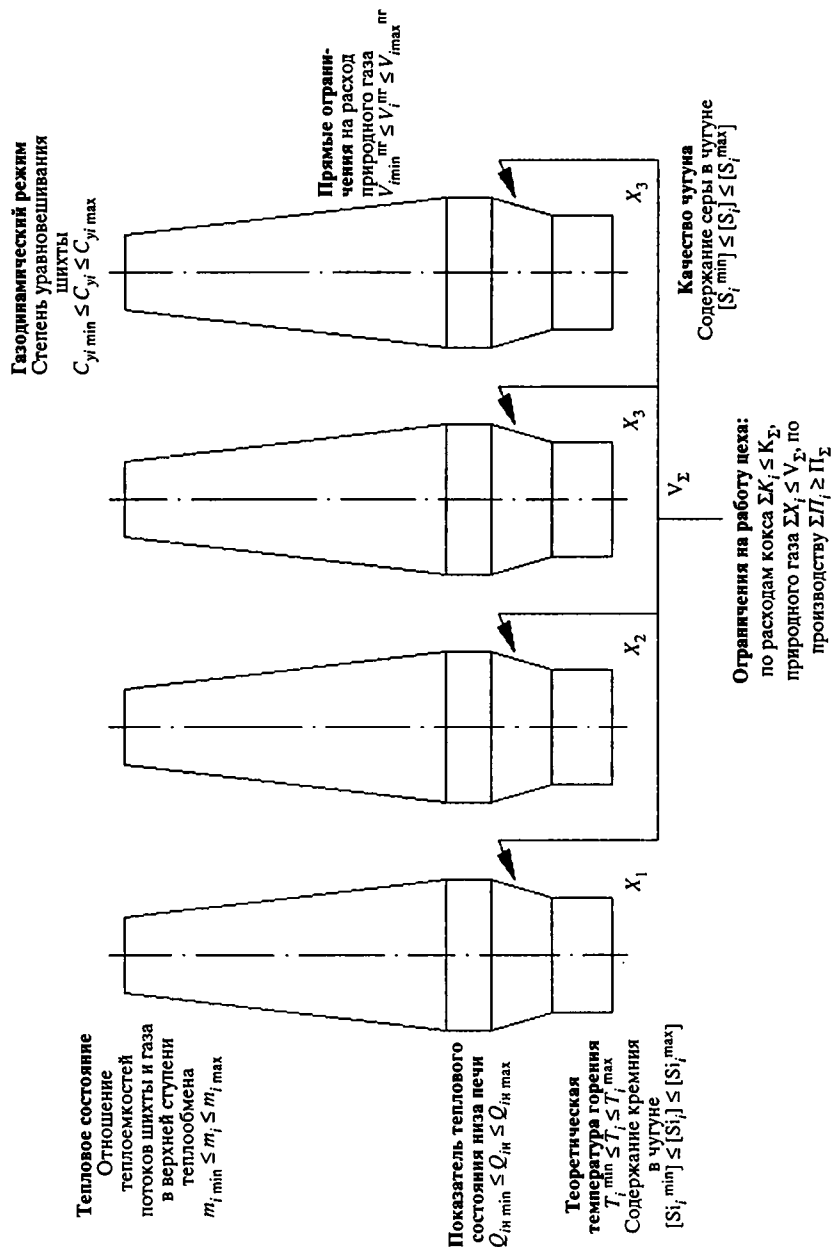


Рис. 3.23. К постановке задачи распределения природного газа в группе доменных печей



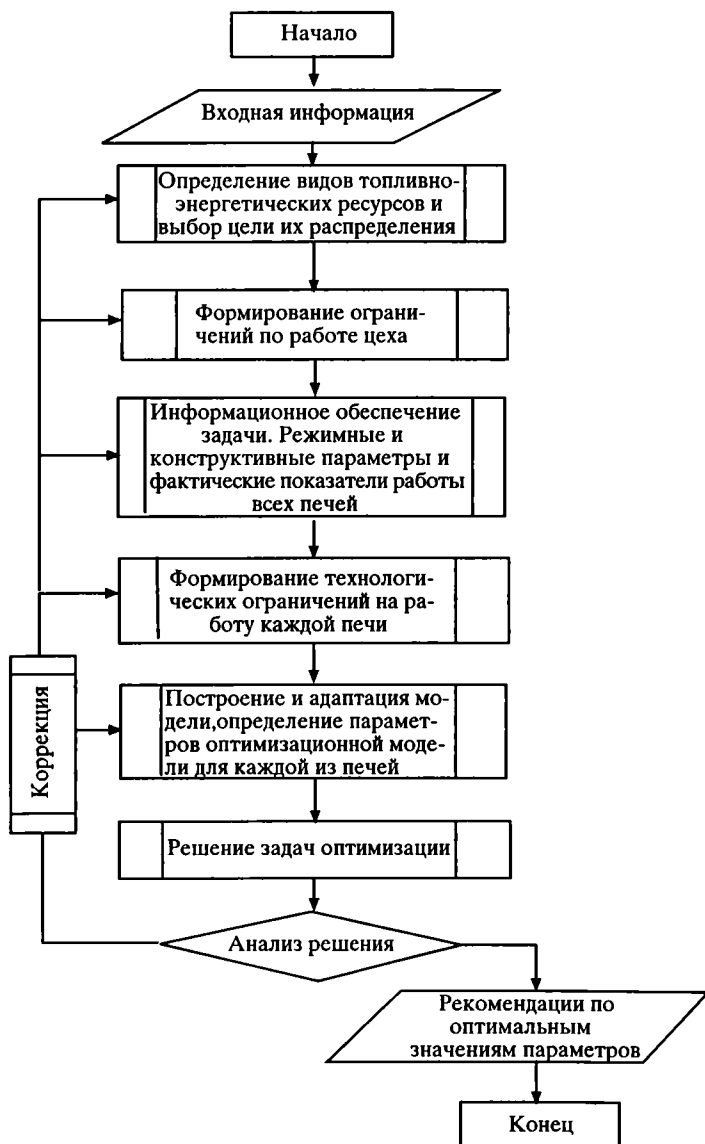


Рис. 3.24. Последовательность решения задачи оптимизации распределения природного газа

Такая линеаризация моделей, связанная с необходимостью субъективного анализа результатов моделирования в системе «компьютер—человек» и возможностью ее упрощения для реализации на компьютерах, позволяет относительно просто дать оценку результирующего влияния комплекса режимных параметров на итоговые прогнозируемые показатели плавки, а также решать задачи оптимизации.

В качестве обобщенного показателя нелинейности доменного процесса используется следующий коэффициент:

$$K_n = I(\Delta Y_{BA}/\Delta Y_{BA}I - 1)I \cdot 100, \quad (3.83)$$

где  $K_n$  — коэффициент нелинейности процесса, %;

$\Delta Y_{BA} = \Sigma(K_i^A(X_i^B - X_i^A))$ ,  $\Delta Y_{AB} = \Sigma(K_i^B(X_i^A - X_i^B))$  — модельные оценки изменения показателя процесса;

$K_i^A$ ,  $K_i^B$  — коэффициенты пересчета показателя процесса для  $i$ -го режимного параметра, полученные с использованием данных о работе доменной печи в периоды  $A$  и  $B$ .

Результаты расчета показателей нелинейности с использованием модели доменной печи и информации о работе доменных печей ОАО ММК для характерных периодов приведены в табл. 3.18.

В рамках описанного подхода были рассчитаны значения коэффициента нелинейности удельного расхода кокса при изменении каждого из режимных параметров доменной плавки для условий работы доменных печей № 4, 6 ОАО ММК (табл. 3.19). Данные этой таблицы характеризуют нелинейность рассматриваемого показателя и подтверждают ее зависимость от условий плавки.

Из приведенных данных следует, что при колебаниях расхода природного газа в пределах  $\pm 25$  м<sup>3</sup>/т чугуна, содержания кислорода в дутье в пределах  $\pm 0,5$  %, коэффициент нелинейности изменяется не более чем на 4—5 %. Дальнейший анализ нелинейности доменного процесса позволил установить пределы изменения режимных параметров, в которых допустимо использование линеаризованных моделей. Применительно к условиям работы доменных печей ОАО ММК область применения линеаризованных моделей не превышает допустимой погрешности (5 %) при изменении одного из режимных параметров плавки — расхода природного газа до 30—35 м<sup>3</sup>/т чугуна. Эти обстоятельства позволяют в дальнейшем использовать линеаризованные модели доменного процесса, поскольку, как показывает практика и подтверждают дальнейшие расчеты, колебания режимных пара-

**Таблица 3.18**  
**Данные об изменениях режимных параметров работы доменных печей и значения коэффициента нелинейности**

Номер пе- чи	Период, год		$\Delta Fe, \%$	$\Delta \omega, \%$	$\Delta V_{дг}, м^3/г$ чугуна	$\Delta t_d, ^\circ C$	$\Delta K_{отч}, кг/т$ чугуна	$\Delta K_{дв}, кг/т$ чугуна	$\Delta K_{ва}, кг/т$ чугуна	$K_n, \%$
	A	B								
3	1997	1998	0,7	0,0	-2,5	-71	5,04	5,99	-5,73	4,34
3	1998	1999	-0,2	0,1	-2,2	16	4,14	4,38	-4,47	2,05
3	1997	1999	0,5	0,1	-4,7	-55	9,18	6,64	-6,36	3,92
5	1997	1998	0,7	0,2	-7,0	34	-10,9	-12,57	12,38	1,48
5	1997	1998	0,8	0,6	-3,5	5,0	-7,53	-8,73	8,82	1,03
10	1997	1998	0,1	0,2	3,6	33	-5,60	-6,36	6,19	2,74
10	1998	1999	0,1	0,3	-12,0	42	4,6	4,93	-4,85	1,62

*Примечания:*  $\Delta Fe$  — изменение содержания железа в железорудной части шихты;  $\Delta \omega$  — изменение содержания кислорода в дутье;  $\Delta V_{дг}$  — изменение расхода природного газа;  $\Delta t_d$  — изменение температуры горячего дутья;  $\Delta K_{отч}$  — изменение расхода кокса по отчетным данным.

Таблица 3.19

**Коэффициенты нелинейности удельного расхода кокса**

Область изменения режимных параметров	Доменные печи	
	№ 4	№ 6
Расход природного газа, $\pm 10 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна	1,14	1,37
Содержание кислорода в дутье $\pm 1,0 \%$	10,37	10,26
Температура дутья, $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$	0,87	0,92

метров печей при перераспределении природного газа на работающих печах цеха ниже указанных пределов.

Таким образом, в целях повышения надежности оценок в модели использованы соотношения в приращениях, позволяющие свести задачу к задаче линейного математического программирования и исключить влияние инструментальных и систематических погрешностей информационных каналов.

Анализ нелинейности доменного процесса показал, что при решении задач оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов в силу относительно небольшого отклонения параметров от базового состояния достаточно использовать линеаризованные зависимости.

Оптимизационная модель в общем случае сводится к следующему [17, 185—188].

**Целевая функция**

$$Z = \sum_{i=1}^n \left\{ \alpha (e_i C_k - C_{\text{пр}}) + (1 - \alpha) C_{\text{п}} \times \right. \\ \left. \times [\Delta \Pi_i^{\text{пр}} - e_i \Delta \Pi_i^{\text{к}}] \right\} V_i^{\text{пр}} \rightarrow \max, \quad (3.84)$$

где  $Z$  — эффективность использования природного газа по цеху, руб./ч;

$n$  — число печей в рассматриваемой группе (цехе);

$\alpha$  — весовой коэффициент,  $0 < \alpha \leq 1$ ;

$e_i$  — эквивалент замены кокса, кг кокса/( $\text{м}^3$  природного газа);

$C_k$  — стоимость кокса, руб./кг кокса;  
 $C_n$  — условно постоянный коэффициент, руб./т чугуна;  
 $\Delta\Pi_i^{nr}$  — изменение производительности, т чугуна/м<sup>3</sup> природного газа;  
 $\Delta\Pi_i^k$  — изменение производительности печи, т чугуна/кг кокса;  
 $V_i^{nr}$  — расход природного газа, м<sup>3</sup>/ч.

Ограничения в целом по цеху

По расходу природного газа

$$\sum_{i=1}^n V_i^{nr} \leq V_{nr}^{\Sigma}, \quad (3.85)$$

где  $V_{nr}^{\Sigma}$  — ресурс цеха по природному газу, м<sup>3</sup>/ч.

По расходу кокса

$$\sum_{i=1}^n \{K_{0i} + 0,001 (V_{i0}^{nr} - V_i^{nr}) e_i\} \leq K_{\Sigma}, \quad (3.86)$$

где  $K_{0i}$  — расход кокса на печь, т/ч;

$K_{\Sigma}$  — резерв по коксу цеха, т/ч;

$V_{i0}^{nr}$  — расход природного газа на печь в базовом периоде, м<sup>3</sup>/ч.

По объему производства чугуна

$$\sum_{i=1}^n \{ (V_i^{nr} - V_{i0}^{nr}) \Delta\Pi_i^{nr} - e_i \times \\ \times (V_i^{nr} - V_{i0}^{nr}) \Delta\Pi_i^k + \Pi_{i0} \} \geq \Pi_{\Sigma}, \quad (3.87)$$

где  $\Pi_{\Sigma}$  — требуемое производство чугуна в цехе, т/ч;

$\Pi_{i0}$  — производительность  $i$ -й печи, т/ч.

Таким образом, в самом общем виде постановка задачи оптимизации в доменном цехе предусматривает учет следующих ограничений на работу цеха:

- объем выделенного цеху природного газа  $V_{nr}^{\Sigma}$ ;
- плановое (требуемое) производство чугуна  $\Pi_{\Sigma}$ ;

• имеющиеся в распоряжении цеха ресурсы по расходу кокса  $K_{\Sigma}$ .  
В процессе решения задачи возможна ситуация, когда цех не может полностью или частично эффективно использовать все указанные ресурсы, тогда часть (или даже все) ограничений, указанных выше, могут оказаться несущественными, и они могли бы не учитываться в процессе решения. Однако это не очевидно и становится ясным только после выполнения процедуры решения.

### Технологические ограничения на каждую из печей цеха

При выборе основных ограничений на тепловое состояние доменной печи использовались физическое обоснование и классификация лимитирующих факторов при инъекции топлив в доменные печи, представленные в работах Б.И. Китаева и его учеников [25, 79].

В общем случае технологические условия, ограничивающие применение природного газа, сводятся к следующему:

- обеспечение достаточного количества тепла в нижней и верхней ступенях теплообмена;
- обеспечение полной конверсии природного газа в районе фурменных очагов;
- стабилизация газодинамического режима слоя шихтовых материалов;
- обеспечение высокой степени использования восстановительного потенциала монооксида углерода и водорода;
- получение чугуна требуемого химического состава с допустимым содержанием в нем серы.

В качестве параметров, характеризующих тепловое состояние печи, приняты:

- 1) *обобщенный показатель теплового состояния низа печи (индекс низа):*

$$Q_{\text{ни}}^{\min} \leq \{ (V_i^{\text{нр}} - V_{i0}^{\text{нр}}) \Delta Q_{\text{ни}}^{\text{нр}} - e_i (V_i^{\text{нр}} - V_{i0}^{\text{нр}}) \Delta Q_{\text{ни}}^{\text{к}} + [\Delta \Pi_i^{\text{нр}} (V_i^{\text{нр}} - V_{i0}^{\text{нр}}) - e_i (V_i^{\text{нр}} - V_{i0}^{\text{нр}}) \Delta \Pi_i^{\text{к}}] \Delta Q_{\text{ни}}^{\text{п}} + Q_{\text{и}0} \} \leq Q_{\text{ни}}^{\max}, \quad (3.88)$$

где  $\Delta Q_{\text{ни}}^{\text{нр}}$  — приращение теплового состояния низа печи при увеличении расхода природного газа на  $\text{м}^3/\text{ч}$ , т. е.  $\text{МДж/т}$  чугуна/ $(\text{м}^3/\text{ч})$ ;

$\Delta Q_{\text{ни}}^{\text{к}}$  — приращение теплового состояния низа печи при увеличении расхода кокса на  $\text{кг}$  кокса/ $\text{ч}$ , т. е.  $\text{МДж/т}$  чугуна/ $(\text{кг}$  кокса/ $\text{ч})$ ;

$\Delta Q_{ин}^n$  — приращение теплового состояния низа печи при увеличении производительности печи на т/ч, т. е. МДж/т чугуна/ (т чугуна/ч);

$Q_{ин0}$  — индекс теплового состояния низа печи в базовом режиме, МДж/т чугуна;

$Q_{ин}^{max}$  — максимально допустимое значение индекса низа печи, МДж/т чугуна;

$Q_{ин}^{min}$  — минимально допустимое значение индекса низа, МДж/т чугуна;

2) теоретическая температура горения на фурмах:

$$T_i^{min} \leq (V_i^{nr} - V_{i0}^{nr})\Delta T_i^{nr} + T_i^0 \leq T_i^{max}, \quad (3.89)$$

где  $\Delta T_i^{nr}$  — изменение теоретической температуры горения при увеличении расхода природного газа на печи на м<sup>3</sup>/ч, т. е. °C/(м<sup>3</sup>/ч);

$T_i^0$  — теоретическая температура горения на  $i$ -й печи в базовом периоде, °C;

$T_i^{max}, T_i^{min}$  — максимально и минимально допустимые значения теоретических температур горения, °C;

3) содержание кремния в чугуне:

$$\begin{aligned} Si_i^{min} \leq (V_i^{nr} - V_{i0}^{nr})\Delta Si_i^{nr} - e_i(V_i^{nr} - V_{i0}^{nr})\Delta Si_i^k + [\Delta \Pi_i^{nr}(V_i^{nr} - V_{i0}^{nr}) - \\ - e_i(V_i^{nr} - V_{i0}^{nr})\Delta \Pi_i^k]\Delta Si_i^n + Si_{i0} \leq Si_i^{max}, \end{aligned} \quad (3.90)$$

где  $\Delta Si_i^{nr}$  — приращение содержания кремния в чугуне (в процентах) при увеличении расхода природного газа на м<sup>3</sup>/ч;

$\Delta Si_i^k$  — приращение содержания кремния в чугуне (в процентах) при увеличении расхода кокса на кг/ч;

$\Delta Si_i^n$  — приращение содержания кремния в чугуне (в процентах) при увеличении производительности печи на т/ч;

$Si_{i0}$  — содержание кремния в чугуне в базовом периоде, %;

$Si_i^{max}, Si_i^{min}$  — максимально и минимально допустимые содержания кремния в чугуне, %;

4) отношение теплоемкостей потоков шихты и газа в верхней ступени теплообмена:

$$\begin{aligned} m_i^{min} \leq (V_i^{nr} - V_{i0}^{nr})\Delta m_i^{nr} - e_i(V_i^{nr} - V_{i0}^{nr})\Delta m_i^k + [\Delta \Pi_i^{nr}(V_i^{nr} - V_{i0}^{nr}) - \\ - e_i(V_i^{nr} - V_{i0}^{nr})\Delta \Pi_i^k]\Delta m_i^n + m_{i0} \leq m_i^{max}, \end{aligned} \quad (3.91)$$

где  $\Delta m_i^{\text{nr}}$  — изменение отношения теплоемкостей потоков при увеличении расхода природного газа на  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$\Delta m_i^{\text{к}}$  — изменение отношения теплоемкостей потоков при увеличении расхода кокса на  $\text{кг}/\text{ч}$ ;

$\Delta m_i^{\text{n}}$  — изменение отношения теплоемкостей потоков при увеличении производительности печи на  $\text{т}/\text{ч}$ ;

$m_{i0}$  — отношение теплоемкостей потоков на печи в базовом режиме;

$m_i^{\text{max}}, m_i^{\text{min}}$  — максимально и минимально допустимые значения отношения теплоемкостей потоков.

5) Учет полноты конверсии природного газа и газодинамического режима доменной плавки сводится к следующему:

- прямые ограничения на расход природного газа на каждую из печей цеха:

$$V_{i\text{min}}^{\text{nr}} \leq V_i^{\text{nr}} \leq V_{i\text{max}}^{\text{nr}}, \quad (3.92)$$

где  $V_{i\text{min}}^{\text{nr}}, V_{i\text{max}}^{\text{nr}}$  — соответственно минимально и максимально допустимые расходы природного газа,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

- степень уравнивания шихты:

$$C_{yi}^{\text{min}} \leq (V_i^{\text{nr}} - V_{i0}^{\text{nr}})\Delta C_{yi}^{\text{nr}} - e_i(V_i^{\text{nr}} - V_{i0}^{\text{nr}})\Delta C_{yi}^{\text{к}} + C_{y0} \leq C_{yi}^{\text{max}}, \quad (3.93)$$

где  $\Delta C_{yi}^{\text{nr}}$  — изменение степени уравнивания шихты при увеличении расхода природного газа на  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$\Delta C_{yi}^{\text{к}}$  — изменение степени уравнивания шихты при увеличении расхода кокса на  $\text{кг}/\text{ч}$ ;

$C_{y0}$  — степень уравнивания шихты в базовом периоде;

$C_{yi}^{\text{min}}, C_{yi}^{\text{max}}$  — соответственно минимально и максимально допустимые степени уравнивания шихты.

6) Качество выплавляемого чугуна оценивается по содержанию серы в чугуне:

$$S_i^{\text{min}} \leq (V_i^{\text{nr}} - V_{i0}^{\text{nr}})\Delta S_i^{\text{nr}} - e_i(V_i^{\text{nr}} - V_{i0}^{\text{nr}})\Delta S_i^{\text{к}} + [\Delta \Pi_i^{\text{nr}}(V_i^{\text{nr}} - V_{i0}^{\text{nr}}) - e_i(V_i^{\text{nr}} - V_{i0}^{\text{nr}})\Delta \Pi_i^{\text{к}}]\Delta S_i^{\text{n}} + S_{i0} \leq S_i^{\text{max}}, \quad (3.94)$$

где  $\Delta S_i^{\text{nr}}$  — приращение содержания серы в чугуне (в процентах) при увеличении расхода природного газа на  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$\Delta S_i^{\text{к}}$  — приращение содержания серы в чугуне (в процентах) при увеличении расхода кокса на  $\text{кг}/\text{ч}$ ;

$\Delta S_i^{\text{n}}$  — приращение содержания серы в чугуне (в процентах) при увеличении производительности печи на  $\text{т}/\text{ч}$ ;



$S_{i0}$  — содержание серы в чугуна на данной печи в базовом периоде, %;

$S_i^{\max}, S_i^{\min}$  — соответственно максимально и минимально допустимые содержания серы в чугуна, %.

Следовательно, в отличие от известных работ, в данной постановке в значительно большей степени учтены ограничения по тепловой работе «верха» ( $m$ ) и «низа» ( $Q_n, T$ ) печи, химическому нагреву (содержание в чугуна  $S_i$ ), качеству чугуна (содержание в чугуна  $S$ ), газодинамическим характеристикам работы печи ( $C_y$ ). При этом предельно допустимые значения величин, т. е. численные значения параметров  $V_{imin}^{pr}, V_{imax}^{pr}, Q_{ni}^{\max}, Q_{ni}^{\min}, T_i^{\max}, T_i^{\min}, S_{ii}^{\max}, S_{ii}^{\min}, m_i^{\max}, m_i^{\min}, S_i^{\max}, S_i^{\min}, C_{yi}^{\min}, C_{yi}^{\max}$ , определяются методом экспертных оценок, что позволяет осуществлять настройку модели на реальный процесс путем формализации опыта инженерно-технического и технологического персонала.

В математическом плане решение задач оптимального распределения технологического кислорода и природного газа не вызывает затруднений [172, 190, 191], поскольку сегодня имеется богатый выбор инструментальных средств решения задач линейного математического программирования (системы Excel, MatLab, MatCAD, Maple, Mathematica и другие).

Разработанная модель позволяет решать задачи оптимального распределения расхода природного газа в следующих технологических ситуациях:

- при сохранении объема ресурсов по расходу природного газа для цеха в целом на постоянном уровне;
- при изменении объема ресурсов по расходу природного газа для цеха в целом;
- для определения максимального объема ресурсов комбинированного дутья, которое может использовать комплекс доменных печей;
- при изменении ресурса по объему кокса, имеющегося в распоряжении цеха;
- при изменении требований задания на объем выплавляемого чугуна комплексом доменных печей;
- при изменении конъюнктуры рынка, т. е. требований обеспечения максимума экономии кокса, обеспечения максимума производства, экономичности работы комплекса печей, цен на топливно-энергетические ресурсы и т. п.;
- в случае изменения режимных и конструктивных параметров печей, входящих в рассматриваемую группу.

Определение коэффициентов оптимизационной модели включает в себя решение задач:

- оценка состояния каждой из доменных печей в базовый период в целях адаптации оптимизационной модели к конкретным условиям печи;
- расчет изменения параметров плавки и характеристик теплового, газодинамического, шлакового режимов при последовательном варьировании расходов кокса, природного газа на каждой из печей цеха (прогноз показателей) при постоянстве остальных входных параметров и отсутствии требований, предъявляемых к химическому составу продуктов плавки, физическим характеристикам шлака и т. п.

В итоге определяются коэффициенты, входящие в левые части матрицы ограничений (см. уравнения (3.85)—(3.94)) и в целевую функцию (уравнение (3.84)). В качестве примера рассмотрим фрагмент решения задачи оптимального распределения природного газа между доменными печами. Целью распределения природного газа являлось достижение максимальной экономии кокса по цеху за счет инъекции природного газа ( $\alpha = 1$ ). На рис. 3.25 представлены расчеты, которые соответствуют варианту, когда объем ресурсов по расходу природного газа для цеха в целом сохраняется на постоянном уровне.

Как следует из этих данных, эффективность использования природного газа на различных доменных печах может существенно отличаться, что должно сопровождаться значительной коррекцией параметров комбинированного дутья.

В результате моделирования для различных условий работы доменного цеха ОАО ММК установлено, что при неизменном расходе природного газа на цех и относительной стабильности работы отдельных печей только за счет его оптимального распределения между печами можно сэкономить до 1,0 % кокса и повысить производство на 0,8 %. При тех же условиях, но отсутствии лимитов по расходу природного газа на цех экономия кокса может достигать 3—4 % при росте производства на 3 %.

Таким образом, оптимизация распределения расхода природного газа в ряде случаев сопровождается значительной коррекцией параметров комбинированного дутья. При наличии соответствующего математического и программного обеспечения инженерно-технический персонал сможет периодически оперативно прогнозировать (уточнять) степень оптимальности пара-

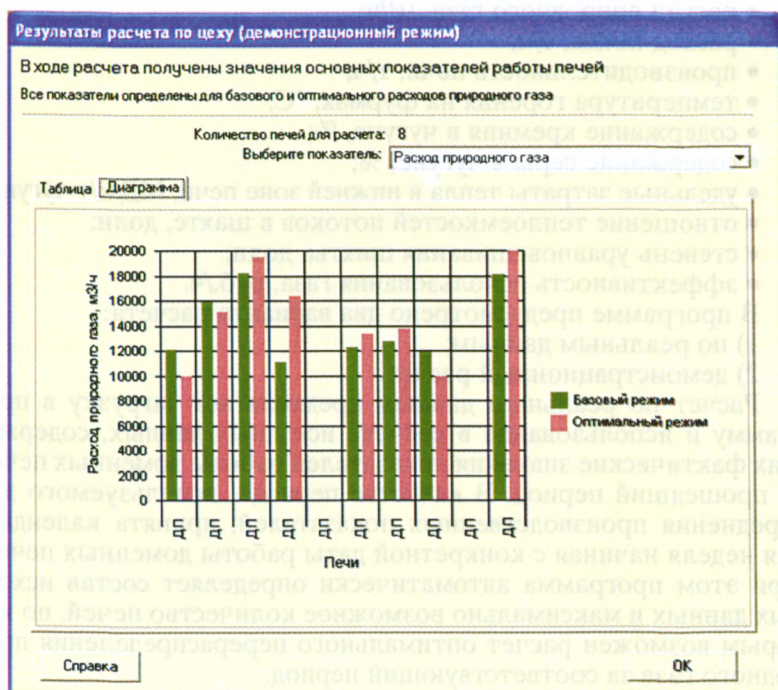


Рис. 3.25. Расходы природного газа на доменных печах ОАО ММК для базового (фактического) и оптимального (расчетного) режимов

метров комбинированного дутья и при необходимости вносить необходимые коррективы.

Следовательно, разработанная автоматизированная подсистема оптимального распределения инжестируемого топлива в режиме «советчик» позволит рекомендовать оптимальные параметры комбинированного дутья на каждой из печей при изменении режимных параметров их работы, объема имеющихся топливно-энергетических ресурсов и конъюнктуры рынка.

### *Программное обеспечение системы*

Программа предназначена для расчета оптимального распределения природного газа в группе доменных печей. Для каждой печи при оптимальной подаче природного газа возможно определение следующих показателей ее работы:

- расход природного газа,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;
- расход кокса,  $\text{т}/\text{ч}$ ;
- производительность печи,  $\text{т}/\text{ч}$ ;
- температура горения на фурмах,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- содержание кремния в чугунах, %;
- содержание серы в чугунах, %;
- удельные затраты тепла в нижней зоне печи,  $\text{МДж}/\text{т}$  чугуна;
- отношение теплоемкостей потоков в шахте, доли;
- степень уравнивания шихты, доли;
- эффективность использования газа,  $\text{руб.}/\text{ч}$ .

В программе предусмотрено два варианта расчета:

- 1) по реальным данным;
- 2) демонстрационный расчет.

Расчет по реальным данным предполагает загрузку в программу и использование в расчете исходных данных, содержащих фактические значения показателей работы доменных печей за прошедший период. В качестве периода, используемого для усреднения производственных показателей, принята календарная неделя начиная с конкретной даты работы доменных печей. При этом программа автоматически определяет состав исходных данных и максимально возможное количество печей, по которым возможен расчет оптимального перераспределения природного газа за соответствующий период.

Демонстрационный расчет используется для моделирования производственных ситуаций. В этом случае производится расчет по данным, содержащимся в настроечных файлах. Все изменения в исходных данных автоматически запоминаются и используются программой при ее последующем вызове.

В программе предусмотрено решение задачи оптимального распределения природного газа для двух периодов работы доменных печей:

- 1) базового;
- 2) проектного.

Расчет для базового периода производится по фактическим исходным данным, отражающим уже произошедший период работы доменных печей. В этом случае пользователь с помощью программы может оценить, насколько эффективно был использован природный газ. В частности, можно рассчитать для прошедшего периода оптимальный расход природного газа на каждую печь, определить показатели работы печей при этом расходе и выполнить сравнительный анализ всех вышеперечисленных

показателей при произошедшей (базовой) и оптимальной подаче природного газа.

В проектном периоде возможен расчет при изменении пользователем некоторых параметров работы доменных печей, например, дутьевых (влажности и температуры дутья, а также содержания в нем кислорода). В этом случае за основу расчета берется базовый период работы доменных печей, т. е. все основные показатели выбираются как усредненные за предшествующую календарную неделю. Расчет по программе для проектного периода можно использовать для определения оптимального распределения природного газа и показателей работы в будущем периоде, когда предполагается изменение дутьевых параметров работы отдельных печей. В этом случае будут рассчитаны оптимальные значения показателей работы для каждой доменной печи.

#### *Условия выполнения программы*

Для выполнения программы требуется наличие операционной системы Microsoft Windows 98/ME/NT/2000/XP.

#### *Мастер загрузки исходных данных*

Запуск программы осуществляется двойным щелчком левой кнопкой мыши на файле с именем Optimpг.exe. После этого на экране появляется главная форма программы, в центре которой изображено окно приветствия (рис. 3.26). В этом окне пользователь с помощью переключателя может выбрать варианты расчета — по реальным данным или демонстрационный — или закрыть окно. В зависимости от выбора пользователя далее последует вызов мастера загрузки исходных данных.

#### *Выбор варианта расчета «По реальным данным»*

На экране появляется первое из четырех окон мастера загрузки исходных данных (рис. 3.27), на котором пользователь должен выбрать дату начала периода импортирования исходных данных. Варианты выбора — прошедшая неделя или самостоятельный выбор даты начала недели по календарю.

На втором шаге пользователю предоставляется возможность выбора двух и более печей для расчета из общего числа доступных (рис. 3.28).

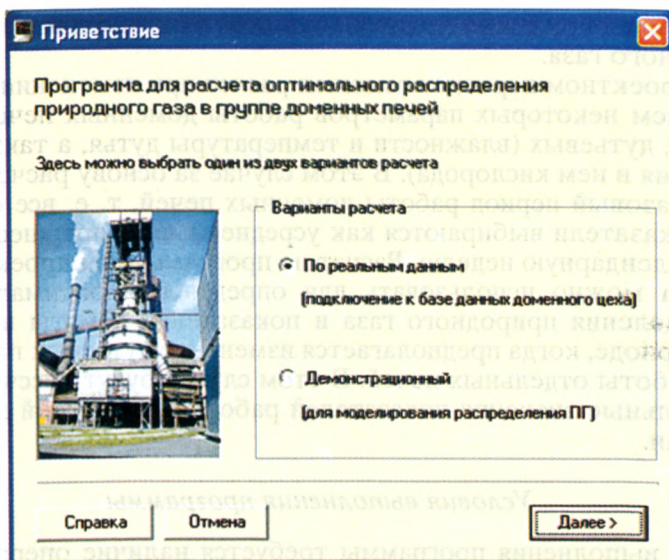


Рис. 3.26. Окно приветствия программы

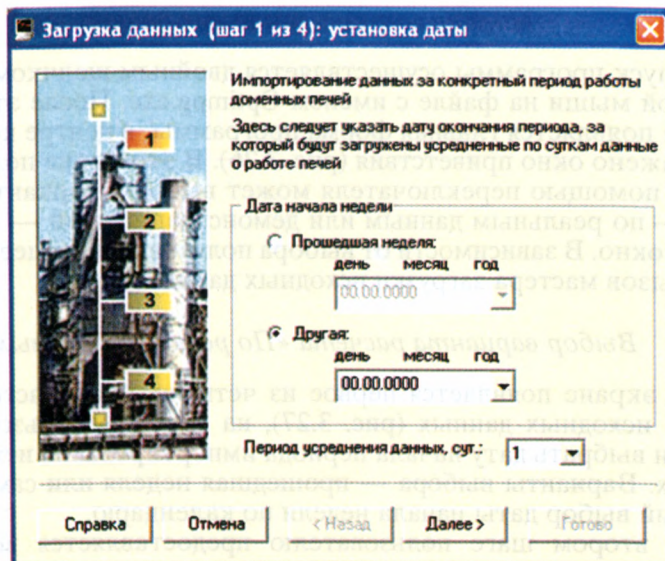


Рис. 3.27. Окно загрузки реальных данных: установка даты



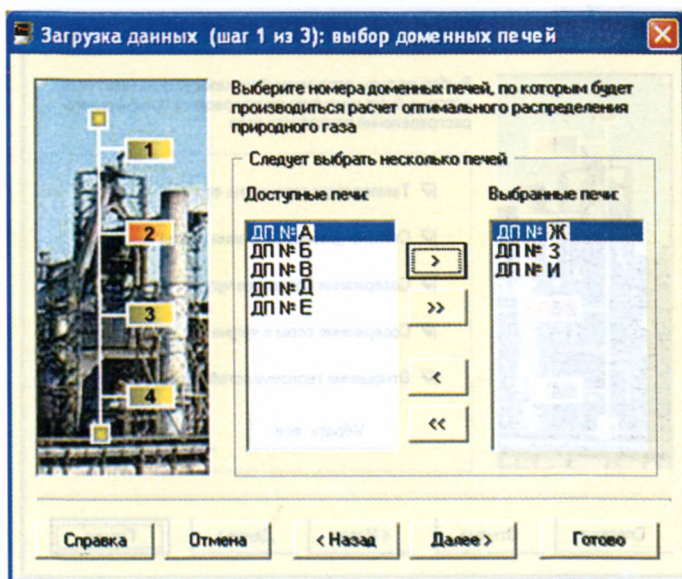


Рис. 3.28. Окно загрузки реальных данных: выбор доменных печей

Общее число доступных печей определяется программой автоматически по наличию исходных данных за период, дату которого определил пользователь на предыдущем шаге.

Третий шаг позволяет пользователю отметить различные типы ограничений на доменные печи, которые будут учитываться при расчете оптимального распределения природного газа (рис. 3.29). Выбор того или иного типа ограничений влияет на величину диапазона варьирования расхода природного газа, в пределах которого будет рассчитываться оптимальный расход.

В программе возможен учет следующих типов ограничений:

- температура горения на фурмах;
- степень уравнивания шихты;
- содержание кремния в чугуна;
- содержание серы в чугуна;
- отношение теплостокостей потоков в шахте.

На последнем, четвертом шаге пользователь должен задать максимальные ресурсы по расходу природного газа ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) и кокса ( $\text{т}/\text{ч}$ ) на группу печей, а также минимально допустимую производительность чугуна в цехе ( $\text{т}/\text{ч}$ ). По умолчанию в окне мастера

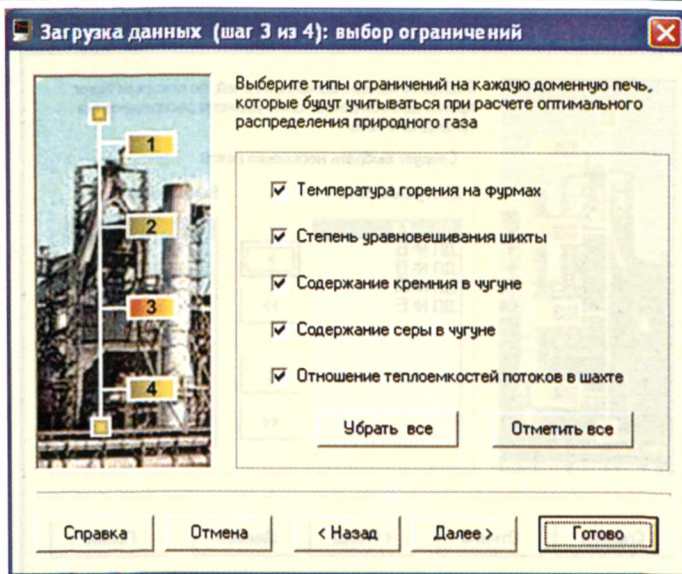


Рис. 3.29. Окно загрузки реальных данных: выбор ограничений

(рис. 3.30) в соответствующих полях для редактирования уже внесенные величины, рассчитанные исходя из базовых значений параметров с учетом количества выбранных печей.

При осуществлении расчетов указанные величины можно переопределить в меню «Данные/Ограничения на цех...». Нажатие кнопки «Готово» приводит к окончанию загрузки исходных данных для расчета.

### *Выбор варианта расчета «Демонстрационный»*

В этом случае пользователь загружает демонстрационные исходные данные с помощью трех шагов мастера. Внешний вид окон мастера аналогичен рассмотренным ранее (см. рис. 3.26—3.29).

### *Главное меню программы*

Главное меню программы включает в себя следующие пункты:

- *Файл*;
- *Данные*;



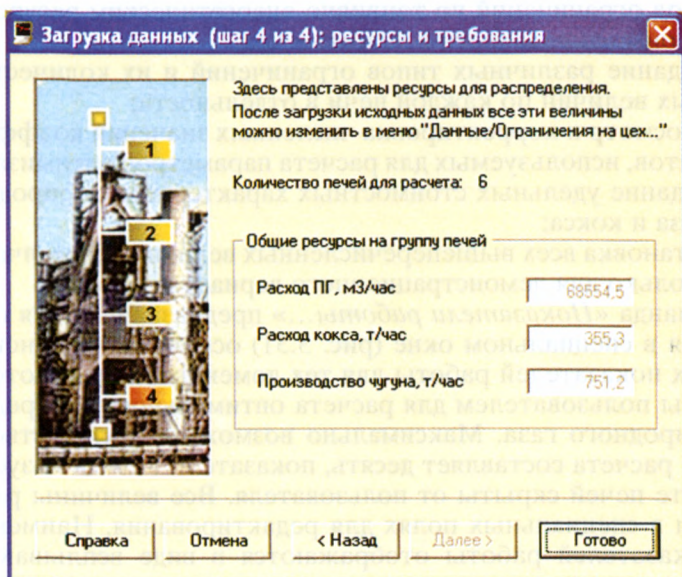


Рис. 3.30. Окно загрузки реальных данных: ресурсы и требования

- *Расчет;*
- *Результаты;*
- *Отчет;*
- *Справка.*

Первоначально после загрузки данных пользователю доступны только первые три пункта меню, а также пункт «Справка». Команды «Результаты» и «Отчет» заблокированы и становятся доступными только после выполнения расчета.

Пункт меню «Файл» позволяет пользователю изменить в течение работы с программой вариант загрузки исходных данных, а также корректно завершить ее выполнение.

#### Пункт меню «Данные»

Приводит к появлению подменю, в котором сгруппированы следующие функциональные категории команд:

- просмотр и корректировка основных усредненных показателей работы доменных печей;

- ввод ограничений по топливно-энергетическим ресурсам и производительности в целом на цех;
- задание различных типов ограничений и их количественных величин по каждой печи в отдельности;
- просмотр и корректировка численных значений коэффициентов, используемых для расчета параметров оптимизации;
- задание удельных стоимостных характеристик природного газа и кокса;
- установка всех вышеперечисленных величин по умолчанию (только для демонстрационного варианта расчета).

Команда «Показатели работы...» предназначена для отображения в специальном окне (рис. 3.31) основных усредненных базовых показателей работы для тех доменных печей, которые выбраны пользователем для расчета оптимального распределения природного газа. Максимально возможное количество печей для расчета составляет десять, показатели не используемых в расчете печей скрыты от пользователя. Все величины расположены в специальных полях для редактирования. Наименования показателей работы отображаются в виде всплывающих подсказок, появляющихся при наведении на соответствующее поле указателя мыши. При необходимости пользователь может скорректировать любую базовую величину.

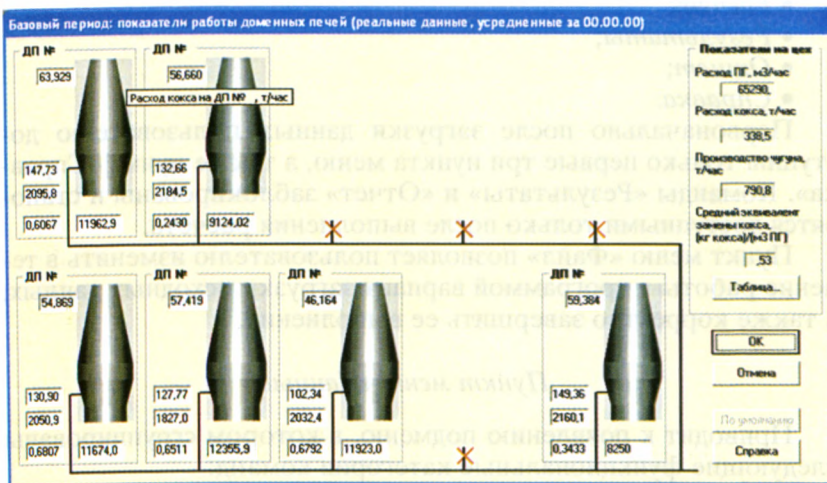


Рис. 3.31. Окно отображения основных базовых показателей работы печей

Основные базовые показатели работы доменных печей, отображаемые в окне на рис. 3.31, следующие:

- расход кокса, т/ч;
- производство чугуна, т/ч;
- температура горения на фурмах, °С;
- эквивалент замены кокса, кг кокса/м<sup>3</sup> газа;
- расход природного газа, м<sup>3</sup>/ч.

В правом верхнем углу окна представлены обобщенные показатели работы цеха, которые рассчитаны по базовым показателям отдельных печей и не поддаются корректировке:

- суммарный расход газа, м<sup>3</sup>/ч;
- суммарный расход кокса, т/ч;
- общая производительность всех печей, т/ч;
- средний эквивалент замены кокса по цеху, кг кокса/м<sup>3</sup> газа.

Нажатие кнопки «Таблица...» приводит к появлению на экране окна с усредненными показателями работы (см. рис. 3.32), в котором помимо вышеперечисленных показателей дополнительно отображены следующие:

- степень уравнивания шихты, доли;
- отношение теплостокостей потоков в шахте, доли;
- показатель теплового состояния низа печи (удельные затраты тепла в нижней зоне печи), МДж/т чугуна;

Базовый период: показатели работы доменных печей (реальные данные, усредненные за 00...

Просмотр и корректировка усредненных значений показателей о работе доменных печей в базовом периоде

Показатель	ДП №	ДП №	ДП №	ДП №	ДП №	ДП №	ДП №
Расход ПГ, м <sup>3</sup> /час	11963	9124				11674	12356
Расход кокса, кг/час	63,93	56,66				54,87	57,42
Эквивалент замены, доли	,61	,24				,68	,65
Производительность печи, т/час	147,7	132,7				130,9	127,8
Степень уравнивания шихты, доли	,436	,321				,381	,403
Отношение теплостокостей потоков, доли	,898	,961				,906	,822
Температура горения, °С	2096	2185				2051	1827
Показатель тепл. сост. низа, МДж/(т чугу)	2736,7	2505,6				2633,4	2577,2
Содержание Si в чугуне, %	,64	,69				,78	,72
Содержание S в чугуне, %	,016	,024				,018	,019

Справка OK Отмена По умолчанию

Рис. 3.32. Таблица отображения базовых показателей работы печей



- содержание кремния в чугуна, %;
- содержание серы в чугуна, %.

Пользователь может скорректировать любой доступный показатель двойным щелчком мыши в соответствующей ячейке таблицы. Нажатие кнопки Esc в процессе редактирования приводит к откату изменяемого показателя и восстановлению его исходной величины. В процессе корректировки каждой ячейки предусмотрена защита от некорректно вводимых данных.

Выбор подпункта меню «Ограничения на цех» приводит к появлению окна, вид которого представлен на рис. 3.33. Здесь отображены суммарные резервные величины по расходам природного газа и кокса в целом по цеху, а также минимально допустимая (требуемая) производительность цеха по чугуна. Первоначально эти величины установлены по результатам выбора пользователя, сделанного им в окне мастера загрузки исходных данных (см. рис. 3.30). Однако пользователь в любой момент может скорректировать эти величины.

Команда «Ограничения на печи...» вызывает появление на экране окна, в котором пользователь может определить различные типы ограничений, а также изменить количественные величины каждого типа для каждой отдельно выбранной для расчета доменной печи (рис. 3.34). Выбор конкретной печи осуществляется из выпадающего списка, в котором присутствуют только те печи, по которым будет проводиться расчет.

В программе возможен учет следующих типов ограничений на доменную печь с установленными максимальными и минимальными значениями соответствующих параметров:

- прямой расход природного газа;

Ограничения на цех (реальные данные, усредненные за 00.00.00)	
Здесь устанавливаются общие ресурсы и требуемое производство чугуна на группу доменных печей	
Ресурс по природному газу, м3/час	68554,5
Ресурс по расходу кокса, т/час	355,3
Требуемое производство чугуна, т/час	751,2
<div> <div>OK</div> <div>Отмена</div> <div>По умолчанию</div> <div>Справка</div> </div>	

Рис. 3.33. Окно ввода и корректировки ограничений на цех

**Ограничения на доменные печи (реальные данные, усредненные за 00.00.00)**

Здесь устанавливаются различные виды и численные значения ограничений, которые будут учтены при расчете оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов

Доменная печь: ДП №А Снять все Установить все

<input checked="" type="checkbox"/> Расход ПГ Минимум <span>ДП №А</span> <span>ДП №Б</span> <span>ДП №В</span> <span>ДП №Г</span> <span>ДП №Д</span> <span>ДП №Е</span> Максимум <span>20000</span>	<input checked="" type="checkbox"/> Содержание Si в чугуне, % Минимум <span>4</span> Максимум <span>1</span>	<input checked="" type="checkbox"/> Степень уравнивания шихты, доли Минимум <span>0</span> Максимум <span>55</span>
<input checked="" type="checkbox"/> Температура горения, °C Минимум <span>1900</span> Максимум <span>2300</span>	<input checked="" type="checkbox"/> Содержание S в чугуне, % Минимум <span>0</span> Максимум <span>0.025</span>	<input checked="" type="checkbox"/> Отношение теплоемкостей потоков в шахте, доли Минимум <span>6</span> Максимум <span>95</span>

Справка OK Отмена По умолчанию

Рис. 3.34. Окно установки ограничений на каждую доменную печь

- температура горения на фурмах;
- степень уравнивания шихты газовым потоком;
- содержание кремния в чугуне;
- содержание серы в чугуне;
- отношение теплоемкостей потоков в шахте печи.

С помощью флажков пользователь может установить или исключить учет соответствующего типа ограничений. В случае установки конкретного типа ограничения его максимальная и минимальная величины будет пересчитываться соответственно на максимально и минимально возможную величины расхода природного газа. В итоге будет изменяться диапазон варьирования величины расхода природного газа на отдельной доменной печи, в пределах которого будет осуществляться поиск его оптимального значения.

Первоначальные предельно допустимые численные значения всех величин, участвующих в ограничениях, автоматически загружаются вместе с исходными данными. Для настройки программы на реальный процесс пользователь может скорректировать указанные величины. Чтобы установить первоначальные значения, необходимо нажать кнопку «По умолчанию», которая активизируется только для демонстрационного варианта расчета.



Команда «Коэффициенты...» позволяет пользователю просмотреть и скорректировать численные значения коэффициентов для каждой печи, которые используются в оптимизационной модели. Вид диалогового окна представлен на рис. 3.35. При наведении курсора мыши на поле редактирования в нижней части окна появляется пояснение физического смысла соответствующего коэффициента. Перечень всех коэффициентов с пояснениями приведен в табл. 3.20.

В случае расчета по реальным данным коэффициенты автоматически рассчитываются для каждой печи по специальной методике анализа реальных показателей доменной плавки за конкретный период ее работы.

Для демонстрационного варианта расчета все коэффициенты поступают в программу из специального настроечного файла «file.dat», который расположен на диске в том же каталоге, из которого производилась загрузка программы. После завершения текущего сеанса работы пользователя все значения коэффициентов сохраняются в этом же файле и используются при последующей загрузке демонстрационного варианта расчета.

Коэффициенты для расчета (реальные данные, усредненные за 00.00.00)

Доменная печь: ДП №  ☒ Редактировать

Коэффициенты			
ПГ - C	<input type="text" value="-.00000131"/>	Кокс - C	<input type="text" value="-.00000426"/>
ПГ - [Si]	<input type="text" value="0.00009872"/>	Кокс - [Si]	<input type="text" value="0.0001611"/>
ПГ - [S]	<input type="text" value="0.00000154"/>	Кокс - [S]	<input type="text" value="0.00000176"/>
ПГ - W	<input type="text" value="-.00000282"/>	Кокс - W	<input type="text" value="0.00000463"/>
ПГ - производит.	<input type="text" value="-.00084457"/>	Кокс - производит.	<input type="text" value="-.00382323"/>
ПГ - T горения	<input type="text" value="0.04067383"/>		
Производит. - C	<input type="text" value="0.0003162"/>	Производит. - [Si]	<input type="text" value="0"/>
Производит. - [S]	<input type="text" value="0.00001345"/>	Производит. - W	<input type="text" value="0.00029874"/>

Коэффициент учитывает изменение степени уравновешивания шихты при увеличении расхода кокса на 1 кг/час, доли/(кг кокса/час). Коэффициент используется для расчета газодинамического режима доменной плавки.

Рис. 3.35. Окно для отображения и корректировки коэффициентов

## Коэффициенты, используемые в оптимизационной модели

№ п/п	Обозначение на форме	Физический смысл	Единицы измерения
1	2	3	4
1	ПГ — С	Коэффициент учитывает изменение степени уравнивания шихты при увеличении расхода природного газа на 1 м <sup>3</sup> /ч. Коэффициент используется для расчета газодинамического режима доменной плавки	доли/(м <sup>3</sup> ПГ/ч)
2	ПГ — [Si]	Коэффициент учитывает изменение содержания кремния в чугуне при увеличении расхода природного газа на 1 м <sup>3</sup> /ч. Коэффициент используется для расчета показателя теплового состояния доменной печи	% [Si]/(м <sup>3</sup> ПГ/ч)
3	ПГ — [S]	Коэффициент учитывает изменение содержания серы в чугуне при увеличении расхода природного газа на 1 м <sup>3</sup> /ч. Коэффициент используется для расчета показателя качества выплавляемого чугуна	% [S]/(м <sup>3</sup> ПГ/ч)
4	ПГ — W	Коэффициент учитывает изменение отношения теплоемкостей потоков шихты и газа при увеличении расхода природного газа на 1 м <sup>3</sup> /ч. Коэффициент используется для расчета показателя теплового состояния верхней части доменной печи	доли/(м <sup>3</sup> ПГ/ч)
5	ПГ — производительность	Коэффициент учитывает прирост производительности доменной печи при увеличении расхода природного газа на 1 м <sup>3</sup> /ч	(т чугуна)/(м <sup>3</sup> ПГ/ч)
6	ПГ — T горения	Коэффициент учитывает изменение температуры горения при увеличении расхода природного газа на 1 м <sup>3</sup> /ч	°C/(м <sup>3</sup> ПГ/ч)
7	Кокс — С	Коэффициент учитывает изменение степени уравнивания шихты при увеличении расхода кокса на	доли/(кг кокса/ч)

Продолжение таблицы 3.20

1	2	3	4
		1 кг/ч. Коэффициент используется для расчета газодинамического режима доменной плавки	
8	Кокс — [Si]	Коэффициент учитывает изменение содержания кремния в чугуне при увеличении расхода кокса на 1 кг/ч. Коэффициент используется для расчета показателя теплового состояния доменной печи	% [Si]/(кг кокса/ч)
9	Кокс — [S]	Коэффициент учитывает изменение содержания серы в чугуне при увеличении расхода кокса на 1 кг/ч. Коэффициент используется для расчета показателя качества выплавляемого чугуна	% [S]/(кг кокса/ч)
10	Кокс — [W]	Коэффициент учитывает изменение отношения теплоемкостей потоков шихты и газа при увеличении расхода кокса на 1 кг/ч. Коэффициент используется для расчета показателя теплового состояния верхней части доменной печи	доли/(кг кокса/ч)
11	Кокс — производительность	Коэффициент учитывает прирост производительности доменной печи при увеличении расхода кокса	(т чугуна)/(кг кокса)
12	Производительность — С	Коэффициент учитывает изменение степени уравнивания шихты при увеличении производительности печи на 1 т/ч. Коэффициент используется для расчета газодинамического режима доменной плавки	доли/(т чугуна/ч)
13	Производительность — [Si]	Коэффициент учитывает изменение содержания кремния в чугуне при увеличении производительности печи на 1 т/ч. Коэффициент используется для расчета показателя теплового состояния доменной печи	% [Si]/(т чугуна/ч)
14	Производительность —	Коэффициент учитывает изменение содержания серы в чугуне при увеличении производительности пе-	% [S]/(т чугуна/ч)



1	2	3	4
	[S]	чи на 1 т/ч. Коэффициент используется для расчета показателя качества выплавляемого чугуна	
15	Производительность — W	Коэффициент учитывает изменение отношения теплоемкостей потоков шихты и газа при увеличении производительности печи на 1 т/ч. Коэффициент используется для расчета показателя теплового состояния верхней части доменной печи	доли/(т чугуна/ч)

Команда «Экономические параметры...» выводит на экран окно, в котором пользователь может просмотреть и скорректировать стоимостные характеристики природного газа и кокса. Вид окна представлен на рис. 3.36. В случае демонстрационного варианта расчета пользователь может задать эти величины из файла настройки, нажав кнопку «По умолчанию».

Команда меню «Установить по умолчанию» активизирована только для демонстрационного варианта расчета. При ее выполнении в текущем сеансе автоматически загружаются все исходные данные из файла настройки. Эту команду удобно использовать, если пользователь ошибочно скорректировал какие-либо исходные данные и захотел загрузить в программу «правильные», корректные величины без завершения программы.

Рис. 3.36. Окно ввода стоимостных характеристик

---

Пункт меню «Расчет»

Включает в себя две команды:

- базовый период;
- проектный период.

Выбор команды «Базовый период» приводит к немедленному выполнению процедуры расчета оптимального распределения природного газа между доменными печами. В этом случае, как уже было отмечено ранее, расчет выполняется на основе усредненных базовых показателей работы доменных печей за прошедший период работы с учетом выбранных типов ограничений. В случае успешного завершения расчета пользователю на экран выводится специальное сообщение. После этого в главном меню программы активизируются команды «Результаты» и «Отчет», которые недоступны пользователю без выполнения команд меню «Расчет». При любых изменениях исходных данных команды «Результаты» и «Отчет» снова будут заблокированы до тех пор, пока пользователь заново не выполнит расчет.

Выбор команды «Проектный период...» позволяет пользователю задать изменение некоторых параметров работы доменных печей в проектном периоде. В частности, возможно изменение следующих дутьевых параметров (рис. 3.37):

- влажность дутья,  $\text{г/м}^3$ ;
- температура дутья,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- содержание кислорода в дутье, %.

В левой части окна с помощью переключателя пользователь выбирает нужную печь. Выбор параметра, который предполагается изменить в будущем для конкретной доменной печи, осуществляется установкой соответствующего флажка. Чтобы облегчить пользователю задание численных значений, рядом с полем редактирования параметра (поле «Проект») приведена величина, усредненная по реальным данным за прошедший период работы печи (поле «База»). Если пользователь задал в поле «Проект» величину, отличную от базовой, то название соответствующего дутьевого параметра для выбранной печи помечается красным цветом.

Пользователь в любой момент может отменить сделанные установки нажатием кнопки «Отмена», что приведет к закрытию этого окна без сохранения изменений. Нажатие кнопки «Расчет» вызывает выполнение процедуры оптимизации, в которой расчет будет произведен на основе новых, проектных значений дутьевых параметров. В случае успешного завершения расчета пользователю выдается соответствующее сообщение.

**Проектный период: изменение параметров работы доменных печей**

Введите проектные параметры работы доменных печей, по которым будет производиться расчет оптимального распределения природного газа

Номер печи

☒ ДП №1

☐ ДП №2

☐ ДП №3

☐ ДП №4

☐ ДП №5

☐ ДП №6

☐ ДП №7

☐ ДП №8

☐ ДП №9

☐ ДП №10

Проектный период

Дутьевые параметры | Шихтовые параметры

☐ Влажность дутья, г/м<sup>3</sup>

Проект  База

☐ Температура дутья, °C

Проект  База

☒ Содержание кислорода в дутье, %

Проект  База

Справка Расчет Отмена

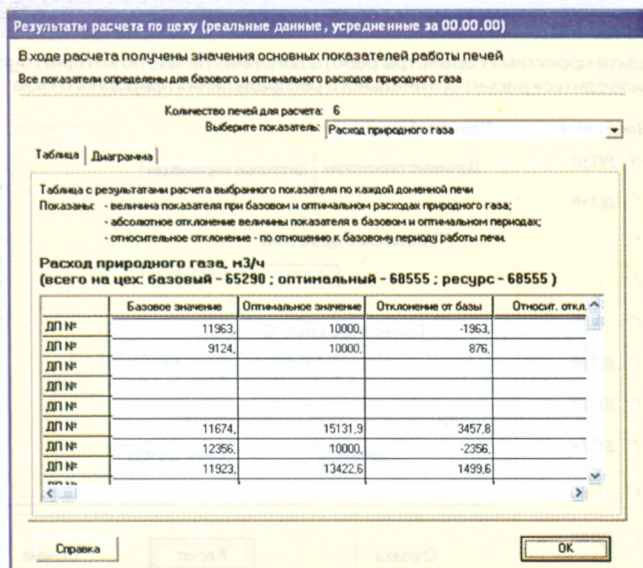
Рис. 3.37. Окно изменения параметров работы доменных печей

### Пункт меню «Результаты»

Данный пункт меню активизируется только после успешного выполнения расчета. Команды подменю разделены на следующие функциональные категории:

- подпункт меню «Таблицы по цеху» позволяет отобразить в табличном виде значения основных показателей работы всех доменных печей, участвующих в расчете. Отображение осуществляется в специальном окне, вид которого представлен на рис. 3.38, а. Здесь представлены оптимальные и базовые значения выбранного показателя для каждой доменной печи, а также их абсолютные и относительные отклонения. Пользователь может в этом же окне выбрать из списка любой доступный показатель, и содержимое окна автоматически обновится;
- подпункт меню «Диаграммы по цеху» вызывает появление окна с графической интерпретацией полученных результатов в виде диаграммы (рис. 3.38, б). Столбики диаграммы

а



б

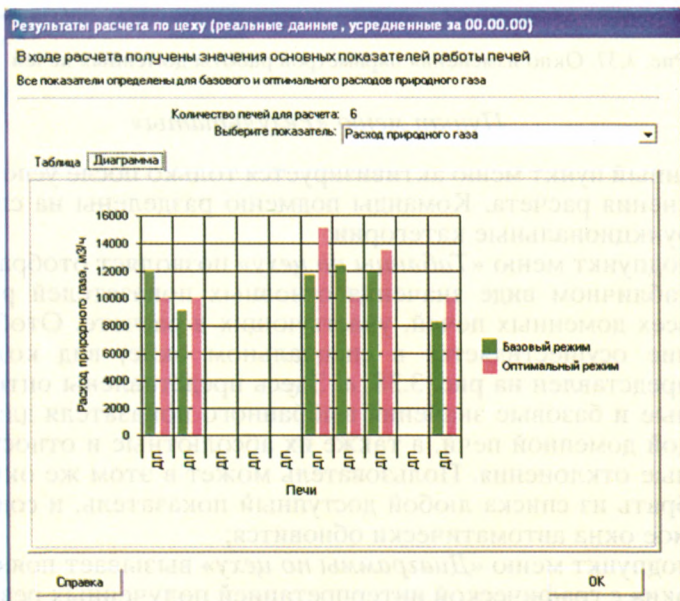


Рис. 3.38. Окно отображения результатов расчета:  
а — табличный вид, б — в виде диаграммы



отображают для каждой печи базовое и оптимальное значения показателя, который выбран для показа. Пользователь может перемещаться по закладкам «Таблица» и «Диаграмма», чтобы просматривать результаты в удобном для него виде;

- подпункт меню «Таблицы по печам» приводит к появлению окна, в котором базовые и расчетные (оптимальные) показатели сгруппированы по отдельным печам (рис. 3.39). Информация по каждой печи представлена на форме в соответствующей закладке. Если печь не участвует в расчете, то пользователю вместо результатов выдается необходимое сообщение;
- подпункт меню «Лимитирующие параметры» отображает пользователю в специальном окне параметры, которые влияют на предельные значения расходов природного газа в каждой доменной печи (рис. 3.40). Выбор печи для представления осуществляется пользователем с помощью переключателя в левой части окна.

Результаты расчета по печам (реальные данные, усредненные за 00.00.00)

ДП №	ДП №	ДП №	ДП №	ДП №	ДП №	ДП №	ДП №	ДП №	ДП №
ДП №	Период работы печи								
	Базовый (Б)	Оптимальный (Опт)	Отклонение (Опт-Б)						
Расход ПГ, м3/ч	11963,	10000,	-1963,						
Расход кокса, т/ч	63,93	65,12	1,19						
Производительность печи, т/ч	147,73	144,84	-2,9						
Температура горения на фурмах, °C	2096,	2176,	80,						
Содержание Si в чугуне, %	,638	,636	-.002						
Содержание S в чугуне, %	,016	,015	-.001						
Уд.затраты тепла в нижней зоне, МДж/т чугу.	2737,	2701,	-36,						
Отношение теплоемкостей потоков в шихте, доли	,9	,91	,01						
Степень уравнивания шихты, доли	,44	,43							

Справка      Лимитирующие параметры ...      ОК

Рис. 3.39. Окно отображения результатов расчета по печам

Лимитирующие параметры (реальные данные, усредненные за 00.00.00)

Параметры, влияющие на предельные значения расходов газа в доменной печи

Печь

- ☐ ДП №
- ☒ ДП №
- ☐ ДП №
- ☐ ДП №
- ☐ ДП №
- ☐ ДП №
- ☐ ДП №
- ☐ ДП №
- ☐ ДП №

Расход природного газа (ресурсы ОГРАНИЧЕНЫ), м<sup>3</sup>/ч

ДП № Базовый: 9124, Оптимальный: 10000.

Расход, м <sup>3</sup> /час		
Предельные расходы ПГ по:	нижний	верхний
• температуре горения	<10000	14666
• степени уравновешивания шихты	<10000	>20000
• содержанию Si в чугуна	<10000	>20000
• содержанию S в чугуна	<10000	12553
• отношению теплоемкостей потоков	13057	>20000

Справка OK

Рис. 3.40. Окно отображения лимитирующих параметров

В окне на рис. 3.40 предельные значения расхода природного газа рассчитаны исходя из установленных типов ограничений. Так, в представленном варианте оптимальное значение расхода природного газа на доменной печи определено как максимальное в диапазоне 10 000—14 666 м<sup>3</sup>/ч. Нижний предел диапазона определяется установленным прямым ограничением на расход природного газа, а верхний — исходя из максимально допустимой температуры горения на фурмах для данной печи.

### Пункт меню «Отчет»

Назначение данного пункта — формирование отчета по результатам расчета, который будет выводиться программой на печать или сохраняться во внешней памяти в текстовых форматах. Выбор данного пункта вызывает появление подменю, функциональные категории команд которого следующие:

- подпункт меню «Просмотр» позволяет пользователю просмотреть и настроить внешний вид отчета по своему желанию в специальном окне, представленном на рис. 3.41. Среди основных функций можно отметить следующие:

- возможность изменения ориентации страницы отчета (книжная или альбомная);
  - установка отображения отдельных блоков информации по исходным данным и результатам, что позволяет пользователю экономить бумагу при распечатке;
  - изменение границ полей, осуществляемое указателем мыши непосредственно в области отчета;
  - более детальный просмотр отдельных фрагментов отчета путем их увеличения с помощью специальной лупы;
  - немедленная отправка на печать настроенного документа;
- подпункты меню «Экспорт в RTF» и «Экспорт в HTML» осуществляют автоматический экспорт сформированного отчета в соответствующие форматы. После выполнения этих процедур пользователю выдаются сообщения с информацией об имени файла, в котором был сохранен отчет, и предложением показать сохраненный вариант отчета в соответствующей программе. Просмотр отчета RTF-формата производится в программе Microsoft Word, а просмотр HTML-формата — в окне браузера, установленного по умолчанию на компьютере пользователя;
  - подпункты меню «Печать...», «Установки страницы...» и «Установки принтера...» вызывают стандартные диалоговые окна для более детальной настройки соответствующих функций.

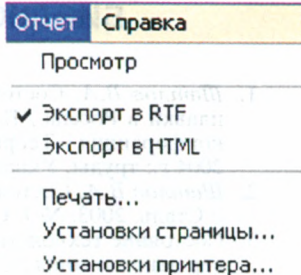


Рис. 3.41. Окно «отчеты»



**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Шатлов В.А.* Состояние производства чугуна и технологии доменной плавки в России / В.А. Шатлов // Международная научно-техническая конференция «Теория и практика производства чугуна», 24—27 мая 2004 г.: труды. Украина. Кривой Рог, 2004. С. 22—27.
2. *Шатлов В.А.* Состояние доменного производства России / В.А. Шатлов // *Сталь*. 2003. № 7. С. 3—5.
3. Состояние технологии доменной плавки и основные направления ее совершенствования / *С.Т. Плискановский [и др.]* // Международный конгресс доменщиков «Производство чугуна на рубеже столетий», 7—12 июня 1999 г.: труды. Днепропетровск; Кривой Рог: Пороги, 1999. С. 31—37.
4. VII Международный конгресс доменщиков, 9—12 сентября 2002 г.: труды. Москва; Череповец, 2002.
5. *Лякишев Н.П.* Вопросы развития современной металлургической технологии / Н.П. Лякишев // *Сталь*. 1991. № 1. С. 1—6.
6. *Пус А.* Будущее доменных печей / А. Пус // РЖ «Производство чугуна». 1991. № 5. Реф. 5В. 144.
7. *Юсфин Ю.С.* Доменная печь — агрегат XXI века / Ю.С. Юсфин, И.Г. Товаровский, П.И. Черноусов, В.А. Шатлов // *Сталь*. 1995. № 8. С. 1—8.
8. *Товаровский И.Г.* Анализ показателей и процессов доменной плавки / И.Г. Товаровский, В.В. Севернюк, В.П. Лялюк. Днепропетровск: Пороги. 2000. 420 с.
9. *Савчук Н.А., Курунов И.Ф.* Доменное производство на рубеже XXI века. АО «Черметинформация», «Новости черной металлургии за рубежом», 2000. 42 с.
10. *Товаровский И.Г.* Эволюция доменной плавки / И.Г. Товаровский, В.П. Лялюк. Днепропетровск: Пороги, 2001. 424 с.
11. *Товаровский И.Г.* Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса / И.Г. Товаровский. М.: Металлургия, 1987. 192 с.
12. Металлургия чугуна: учебник для вузов / *Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев, Ю.С. Юсфин, В.М. Клемперт*. М.: Металлургия, 1989. 512 с.
13. *Курунов И.Ф.* Шихтовые материалы, кокс, эксплуатация и показатели работы доменных печей / И.Ф. Курунов // *Сталь*. 2001. № 3. С. 7—13.
14. Структура трехуровневой АСУ ТП доменной печи с использованием логико-количественной экспертной системы / *В.Г. Лисиенко, Е.Л. Суханов, В.А. Морозова, Ю.Н. Овчинников*. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 2004. 82 с.
15. *Сысоев Н.П.* История развития и современное состояние доменного процесса / Н.П. Сысоев // *Металлург*. 2002. № 1. С. 37—39.
16. *Изюмский Н.Н.* Современные промышленные системы автоматизации доменных печей мира / Н.Н. Изюмский, А.П. Васильев // Международная научно-техническая конференция «Теория и практика производства чугуна», 24—27 мая 2004 г.: труды. Украина. Кривой Рог, 2004. С. 48—68.
17. Информационные системы в металлургии / *Н.А. Спирин, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов, В.А. Краснобаев, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев*,



- В.С. Швыдкий, С.А. Загайнов, О.П. Онорин. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 2001. 617 с.
18. Современная автоматизированная информационная система доменной плавки / В.А. Краснобаев [и др.] // *Сталь*. 2000. № 9. С. 7—10.
  19. Современные принципы построения и реализации информационно-моделирующих систем сложных теплотехнических агрегатов / В.А. Краснобаев, Н.А. Спириин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, К.А. Щипанов // *Международная конференция «Теплотехника и энергетика в металлургии»*: труды. Украина. Днепропетровск, 2002. С. 34—38.
  20. Информационно-моделирующая система поддержки принятия решений для управления доменной плавкой на ОАО ММК / В.Л. Терентьев, В.А. Краснобаев, В.Ю. Рыболовлев, И.Е. Косаченко, Н.А. Спириин, Л.Ю. Гилева, С.А. Загайнов, О.П. Онорин // *Международная научно-техническая конференция «Теория и практика производства чугуна»*, 24—27 мая 2004 г.: труды. Украина. Кривой Рог, 2004. С. 490—494.
  21. Китаев Б.И. Схема теплообмена в доменной печи и подготовка руд к плавке / Б.И. Китаев // *Сталь*. 1944. № 7—8.
  22. Китаев Б.И. Теплообмен в шахтных печах / Б.И. Китаев // Свердловск; Москва: Металлургиздат, 1945. 152 с.
  23. Китаев Б.И. Теплообмен в доменной печи / Б.И. Китаев // М.: Металлургиздат, 1949. 48 с.
  24. Китаев Б.И. Теплообмен в шахтных печах / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, В.Д. Сучков. Свердловск; Москва: Металлургиздат, 1957. 280 с.
  25. Китаев Б.И. Теплообмен в доменной печи / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Б.Д. Лазарев. М.: Металлургия, 1966. 355 с.
  26. АСУ тепловыми и газодинамическими режимами доменной печи / И.Н. Богаенко, Г.Г. Грабовский, Н.А. Рюмишин, К.А. Шумилов. Киев: Техника, 2000. 228 с.
  27. Серов Ю.В. Развитие автоматизации доменных печей / Ю.В. Серов // *Сталь*. 1993. № 4. С. 10—16.
  28. Серов Ю.В. Автоматизация доменных печей. Итоги XX века / Ю.В. Серов // *Сталь*. 2001. № 8. С. 45—51.
  29. Автоматизация доменных печей / Н.Н. Изюмский, А.П. Пухов, В.Л. Сафрис, М.А. Цейтлон // *Черная металлургия*. 1991. № 4. С. 31—36.
  30. Разработка АСУТП нового поколения для доменной печи № 5 КМК / В.И. Котухов, С.В. Коршиков, Г.Я. Анисимов, А.Е. Кошелев, В.А. Шанин // *Сталь*. 1993. № 4. С. 22—25.
  31. Курунов И.Ф. Новые средства контроля и управления доменным процессом / И.Ф. Курунов // *Сталь*. 2001. № 8. С. 58—62.
  32. Тараканов А.К. Совершенствование средств контроля и управления доменной плавкой / А.К. Тараканов // *Международный конгресс доменщиков «Производство чугуна на рубеже столетий»*, 7—12 июня 1999 г.: труды. Днепропетровск; Кривой Рог: Пороги, 1999. С. 37—42.
  33. Жеребин Б.Н. Практика ведения доменной печи / Б.Н. Жеребин. М.: Металлургия, 1980. 248 с.
  34. Разработка математической модели с переменной структурой для анализа и прогноза показателей работы доменной печи на основе отчетных данных / Л.Ю. Гилева, Ю.Г. Ярошенко, С.А. Загайнов, Е.Л. Суханов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1993. № 4. С. 51—55.
  35. Загайнов С.А. Анализ работы доменных печей с использованием модели теплового состояния / С.А. Загайнов, О.П. Онорин, Л.Ю. Гилева //

- Научные школы УПИ—УГТУ № 2 «С творческим наследием Б.И. Кистаева — в XXI век»: труды Международной конференции. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 1998. С. 195—200.
36. Овчинников Ю.Н. Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки / Ю.Н. Овчинников, В.И. Мойкин, Н.А. Спирин, Б.А. Боковиков. Челябинск: Metallurgy, 1989. 120 с.
  37. Товаровский И.Г. Применение математических методов и ЭВМ для анализа и управления доменным процессом / И.Г. Товаровский, Е.И. Райх, К.К. Шкодин, В.А. Улахович. М.: Metallurgy, 1978. 204 с.
  38. Гилева Л.Ю. Анализ нелинейности характеристик доменного процесса / Л.Ю. Гилева, С.А. Загайнов, Ю.Г. Ярошенко, О.П. Онорин, Е.Л. Суханов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1994. № 8. С. 66—68.
  39. Тогобицкая Д.Н. Информационно-аналитическая система для оперативного анализа работы доменных печей в среде локальной вычислительной сети МК «Днепропетровский» / Д.Н. Тогобицкая, Г.Л. Цымбал, А.Ф. Лоза, А.И. Белькова // V Международный конгресс доменщиков: труды. Днепропетровск: йороги, 1999. С. 402—403.
  40. Внедрение централизованной АСУ ТП доменной печи № 3 увеличивает производство на заводе Ланверн фирмы British Steel. Central control boosts iron output at BritishSteel Lanwern // Steel Times. 1992. N 6. С. 220—268.
  41. Совершенная технология управления и систем контроля для доменной печи / Otsuka R. [e.a.] // Сумитомо киндзоку=Sumitomo Metals. 1992. № 1. С. 161—172.
  42. Разработка экспертной системы для долгосрочного управления работой доменной печи / Kenaga Yasuharu // Дзайре то пуросэсу = Cunt. and Mater. and Proc. 1991. 4. № 5. С. 1384.
  43. 3rd European Ironmaking Congress. Proceedings, Gent, Belgium, September 16—18, 1996.
  44. 4rd Europe Cjke and Ironmaking Congress. Proceedings, Paris La Defanse, France, June 19—20, 2000.
  45. 59rd Ironmaking Congress. Proceedings, Pittsburgh, USA, March 26—29, 2000.
  46. 60rd Ironmaking Congress. Proceedings, Baltimore, USA, March 25—28, 2001.
  47. 61rd Ironmaking Congress. Proceedings, Nashville, Tennessee, USA, March 10—13, 2002.
  48. 62rd Ironmaking Congress. Proceedings, Indianapolis, Indiana, USA, April 27—30, 2003.
  49. Серов Ю.В. Новые системы автоматизации доменных печей / Ю.В. Серов // Бюллетень научно-технической информации. Черная металлургия. 1991. № 11. С. 3—29.
  50. Серов Ю.В. Новые средства контроля и диагностики доменных печей / Ю.В. Серов // Бюллетень научно-технической информации. Черная металлургия. 1990. № 7. С. 2—19.
  51. Серов Ю.В. Метрологическое обеспечение технологических процессов черной металлургии (метрология и информатика): справ. изд-е: в 2 кн. / Ю.В. Серов. М.: Metallurgy, 1993. Кн. 1. 272 с.; кн. 2. 352 с.
  52. Спирин Н.А. Разработка информационно-моделирующей системы управления сложными объектами в условиях нестабильности их работы (на примере доменной плавки) / Н.А. Спирин, К.А. Щипанов, В.В. Лав-

- ров, О.П. Онорин, А.И. Перминов // IV Всероссийская научно-практическая конференция «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве»: труды. Новокузнецк, 2003. С. 23—25.
53. Соловьев В.И. Экспертная система для диагностики и регулирования хода доменной печи / В.И. Соловьев, В.А. Краснобаев, Ю.А. Сарапулов, Е.А. Павлов // Международная научно-техническая конференция «Теория и практика производства чугуна», 24—27 мая 2004 г.: труды. Украина. Кривой Рог, 2004. С. 484—487.
54. Интеллектуальная система регулирования: пат. № 2002120524 Рос. Федерация: МПК 7G 05 B13/02 / В.И. Соловьев [и др.]. № 2002120524/09; заявл. 01.08.2002; опубл. 20.05.2004.
55. Федулов Ю.В. Оптимизация хода доменной плавки / Ю.В. Федулов. М.: Metallurgia, 1989. 151 с.
56. Волков Ю.П. Технолог-доменщик / Ю.П. Волков, Л.Я. Шпарбер, А.К. Гусаров. М.: Metallurgia, 1986. 263 с.
57. Остроухов М.Я. Справочник мастера-доменщика / М.Я. Остроухов, Л.Я. Шпарбер. М.: Metallurgia, 1976. 304 с.
58. Ефименко Г.Г. Metallurgia чугуна / Г.Г. Ефименко, А.А. Гиммельфарб, В.Е. Левченко. Киев: Вища школа, 1981. 495 с.
59. Практика доменного производства / Б.Ф. Чернобровец, В.В. Капорун, В.А. Завидонский. М.: Metallurgia, 1992. 111 с.
60. Рамм А.Н. Современный доменный процесс / А.Н. Рамм. М.: Metallurgia, 1980. 304 с.
61. Спирин Н.А. Введение в системный анализ теплофизических процессов metallurgии / Н.А. Спирин, В.С. Швыдкий, В.И. Лобанов, В.В. Лавров. Екатеринбург: УГТУ, 1999. 205 с.
62. Товаровский И.Г. Развитие расчетных методов анализа доменной плавки в XX веке / И.Г. Товаровский // Сталь. 2001. № 7. С. 8—10.
63. Blast Furnace Aerodynamics / Ed. by N. Standish. Wollongong, 1975. 220.
64. Авдеев В.П. Творческое наследие Б.И. Китаева в теории и практике многовариантных систем информатики и управления / В.П. Авдеев, Е.Л. Суханов // Научные школы УПИ—УГТУ № 2 «С творческим наследием Б.И. Китаева — в XXI век». Екатеринбург: УГТУ, 1998. С. 191—194.
65. Авдеев В.П. Идентификация промышленных объектов с учетом нестационарностей и обратных связей / В.П. Авдеев, Т.М. Даниелян, П.Г. Белоусов. Новокузнецк: СибМИ, 1984. 88 с.
66. Рамм А.Н. Определение технических показателей доменной плавки / А.Н. Рамм // Метод расчета и справочные данные. Л.: ЛПИ, 1971. 110 с.
67. Доменное производство: справочник / Под редакцией И.П. Бардина. М.: Metallurgizdat, 1963. Т. 1. 648 с.
68. Шур А.Б. Использование балансовых расчетов для текущего анализа результатов доменной плавки / А.Б. Шур, Н.Н. Лепило, А.Э. Литвик // Всесоюзная конференция «Моделирование процессов в шахтных и доменных печах»: тез. докл. Свердловск, 1988. С. 41—42.
69. Шур А.Б. Составление материальных и тепловых балансов доменной плавки / А.Б. Шур // Доменное производство: приложение к журналу «Сталь». М.: Metallurgizdat, 1961. С. 13—23.
70. Павлов М.А. Metallurgia чугуна. Ч. 2. Доменный процесс / М.А. Павлов. М.: Metallurgia, 1949. 628 с.
71. Любан А.Н. Анализ явлений доменного процесса / А.Н. Любан. М.: Metallurgia, 1962. 532 с.

72. Готлиб А.Д. Доменный процесс / А.Д. Готлиб. М.: Металлургия, 1966. 503 с.
73. Юрьев Б.Н. Методы расчета доменной плавки / Б.Н. Юрьев, Л.В. Юрьева. М.: Металлургия, 1961. 304 с.
74. Ешар Р. Газодинамика и теплотехника доменного процесса / Р. Ешар [и др.] // Черные металлы. 1971. № 12. С. 1—40.
75. Доменное производство: справ. изд. Т. 1. Подготовка руд и доменный процесс / Под ред. Е.Ф. Вегмана. М.: Металлургия, 1989. 496 с.
76. Писи Дж. Доменный процесс. Теория и практика / Дж. Писи, В.Г. Давенпорт. М.: Металлургия, 1984. 142 с.
77. Мишар Ж. Тепловые балансы и теплообмен в доменной печи / Ж. Мишар. М.: Металлургиздат, 1963. 151 с.
78. Ченцов А.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса / А.В. Ченцов, Ю.А. Чесноков, С.В. Шаврин. М.: Наука, 1991. 92 с.
79. Китаев Б.И. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий. М.: Металлургия, 1978. 248 с.
80. Китаев Б.И. Управление доменным процессом / Б.И. Китаев. Свердловск: УПИ, 1984. 94 с.
81. Китаев Б.И. Тепло- и массообмен в плотном слое / Б.И. Китаев [и др.] // М.: Металлургия, 1972. 432 с.
82. Гордон Я.М. Тепловая работа шахтных печей и агрегатов с плотным слоем / Я.М. Гордон, Б.А. Боковиков, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. М.: Металлургия, 1989. 120 с.
83. Маханек Н.Г. Особенности теплообмена в доменной печи / Н.Г. Маханек // Металлургия чугуна: сборник. Свердловск, 1960. Вып. 105. С. 22—26.
84. Клименко В.А. Основы физики доменного процесса / В.А. Клименко, Л.С. Токарев. Челябинск: Металлургия, 1991. 288 с.
85. Спири́н Н.А. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки / Н.А. Спири́н, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 1995. 243 с.
86. Спири́н Н.А. О схемах теплообмена в доменной печи / Н.А. Спири́н [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. 1991. № 9. С. 16—18.
87. Ярошенко Ю.Г. Закономерности теплообмена в доменной печи при неравномерном распределении потоков материала и газа / Ю.Г. Ярошенко, Н.А. Спири́н, В.С. Новиков, Ю.Н. Овчинников, Ю.В. Федулов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1992. № 6. С. 55—58.
88. Восстановление, теплообмен и гидродинамика в доменном процессе / Под ред. С.В. Шаврина // Труды института металлургии УФАИ СССР. Часть 1, вып. 24, 1970. 130 с.; часть 2, вып. 26, 1972. 140 с.
89. Тараканов А.К. Оптимизация базовых режимов работы доменных печей и методов оперативного управления доменной плавкой с использованием математических моделей и ЭВМ / А.К. Тараканов // Международный конгресс доменщиков «Производство чугуна на рубеже столетий», 7—12 июня 1999 г.: труды. Днепропетровск; Кривой Рог: Пороги, 1999. С. 398—399.
90. Лисиенко В.Г. Построение логических экспертных систем для управления технологическими процессами в доменных печах / В.Г. Лисиенко [и др.] // Международный конгресс доменщиков «Производство чугуна на рубеже столетий», 7—12 июня 1999 г.: труды. Днепропетровск; Кривой Рог: Пороги, 1999. С. 403—405.

91. Лисиенко В.Г. Принципы построения экспертных систем в металлургии на примере экспертной системы «Советчик мастера доменной печи» / В.Г. Лисиенко [и др.]. Екатеринбург: УГТУ, 1996. 45 с.
92. Математическое моделирование доменного процесса / Под ред. проф. С.В. Шаврина / Институт металлургии УрО РАН. Екатеринбург: УрО РАН, 1994. 72 с.
93. Дмитриев А.Н. Балансовая (равновесная) математическая модель / А.Н. Дмитриев // Математическое моделирование доменного процесса: науч. докл. / Институт металлургии УрО РАН. Екатеринбург: УрО РАН, 1994. С. 6—21.
94. Доброскок В.А. Математические модели процессов газодинамики и восстановления в доменной печи / В.А. Доброскок, Н.А. Кузнецов, А.И. Туманов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. № 3. С. 145—146.
95. Доброскок В.А. Метод разработки новых технологических режимов доменной плавки на основе комплекса математических моделей / В.А. Доброскок, А.И. Туманов, А.В. Ганчев // Изв. вузов. Черная металлургия. 1987. № 5. С. 146—147.
96. Френкель М.М. Экспертная система управления ходом доменной плавки / М.М. Френкель, Ю.В. Федулов, О.А. Белова, В.А. Краснобаев // Сталь. 1992. № 7. С. 15—18.
97. Lida O. Применение управляющей системы с искусственным интеллектом в доменном производстве. Application of a techniques to blast furnace operation / O. Lida, S. Taniyochi, T. Hetani // Kawasaki Steel Techn Dept. 1992. N 26. С. 30—37.
98. Мойкин В.И. Теплотехнический анализ работы доменной печи на металлизированной шихте методом математического моделирования / В.И. Мойкин, Б.А. Боковиков, Н.М. Бабушкин // Сталь. 1978. № 11. С. 982—986.
99. Мойкин В.И. Анализ работы доменной печи на комбинированном дутье с применением метода математического моделирования / В.И. Мойкин, Н.М. Бабушкин, Б.А. Боковиков // Сталь. 1984. № 4. С. 9—14.
100. Дмитриев А.Н. Двумерная математическая модель доменного процесса / А.Н. Дмитриев, С.В. Шаврин // Сталь. 1996. № 12. С. 7—13.
101. Дмитриев А.Н. Исследование температурных и скоростных полей с помощью двумерной математической модели при использовании новых технических решений / А.Н. Дмитриев, С.В. Шаврин // Сталь. 1998. № 5. С. 5—8.
102. Дмитриев А.Н. Анализ аномальных явлений доменной плавки / А.Н. Дмитриев, С.В. Шаврин // Сталь. 1998. № 8. С. 13—16.
103. Дмитриев А.Н. Использование математического моделирования при разработке и совершенствовании пирометаллургических процессов переработки комплексного сырья / А.Н. Дмитриев // Международная научно-практическая конференция «На передовых рубежах науки и инженерного творчества»: труды. Екатеринбург, УГТУ—УПИ, 2004.
104. Дмитриев А.Н. Использование закономерностей тепломассообмена и газодинамики при разработке математических моделей и решении практических задач доменной плавки / А.Н. Дмитриев, С.В. Шаврин // Научные школы УПИ—УГТУ № 2 «С творческим наследием Б.И. Китаева — в XXI век»: труды Международной конференции. Екатеринбург: УГТУ, 1998. С. 89—95.

105. *Леонтьев Л.И.* Пирометаллургическая переработка комплексных руд / Л.И. Леонтьев, Н.А. Ватолин, С.В. Шаврин, Н.С. Шумаков. М.: Металлургия, 1997. 432 с.
106. *Туманов А.И.* Математическая модель газодинамики в зоне плавления доменной печи / А.И. Туманов, В.А. Доброскок, А.В. Воложин // Изв. вузов. Черная металлургия. 1987. № 3. С. 146—147.
107. *Доброскок В.А.* Использование математических моделей с целью разработки высокоэкономичных ресурсосберегающих и утилизационных технологий выплавки чугуна / В.А. Доброскок, А.Г. Чижиков, И. Мернитц, Е.Ю. Губская // Международная научно-практическая конференция «Автоматизированный печной агрегат — основа энергосберегающих технологий металлургии XXI века»: труды. М.: Московский государственный институт стали и сплавов, 2000. С. 278—280.
108. *Абрамов С.Д.* Макрокинетика восстановления железорудных материалов газами. Математическое описание / С.Д. Абрамов, Л.Ф. Алексеев, Д.З. Кудинов, А.В. Ченцов, С.В. Шаврин // М.: Наука, 1982. 104 с.
109. *Богданди Л.Ф.* Восстановление железных руд / Л.Ф. Богданди, Г.Ю. Энгель. М.: Металлургия, 1971. 519 с.
110. Проблемы автоматизированного управления доменным производством / Под ред. К.А. Шумилова. Киев.: Наукова Думка, 1974. 284 с.
111. *Попырин Л.С.* Математическое моделирование и оптимизация теплотенергетических установок / Л.С. Попырин. М.: Энергия, 1978. 415 с.
112. *Вышинская Е.Д.* Система текущего и стратегического планирования финансовых, сырьевых и технологических условий работы коксо-агло-доменного производства / Е.Д. Вышинская [и др.] // Международный конгресс доменщиков «Производство чугуна на рубеже столетий», 7—12 июня 1999 г.: труды. Днепропетровск; Кривой Рог: Пороги, 1999. С. 414—416.
113. *Бабарыкин Н.Н.* Выделение и использование тепла в доменной печи: курс лекций / Н.Н. Бабарыкин. Магнитогорск: МГМА, 1997. 100 с.
114. Зондовая сканирующая система: пат. 2119537 Рос. Федерация: МПК 6С21В7/24 / В.А. Доброскок [и др.]. № 97114197/02; заявл. 20.08. 1997; опубл. 27.09.1998.
115. *Изюмский Н.Н.* Автоматизированная система стабилизации шлакового режима доменной печи / Н.Н. Изюмский [и др.] // Международный конгресс доменщиков «Производство чугуна на рубеже столетий», 7—12 июня 1999 г.: труды. Днепропетровск; Кривой Рог: Пороги, 1999. С. 407—410.
116. *Тогобицкая Д.Н.* Физико-химические основы создания системы контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки в изменяющихся шихтовых и технологических условиях / Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотько, А.И. Белькова, П.И. Оторвин // Международная научно-техническая конференция «Теория и практика производства чугуна», 24—27 мая 2004 г.: труды. Украина. Кривой Рог, 2004. С. 504—508.
117. *Тогобицкая Д.Н.* Информационное, алгоритмическое и программное обеспечение для решения задач оптимизации доменной шихты / Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотько, А.И. Белькова // Металлург. 1999. № 6. С. 42—43.
118. *Никитин Г.М.* Определение параметров вязкопластичной зоны в доменной печи / Г.М. Никитин, В.Н. Беляков, Н.Т. Данаев // Сталь. 1992. № 4. С. 11—16.

119. Вегман Е.Ф. Теоретические проблемы металлургии чугуна / Е.Ф. Вегман, В.О. Чугель. М.: Машиностроение, 2000. 348 с.
120. Тарасов В.П. Газодинамика доменного процесса / В.П. Тарасов. М.: Металлургия, 1982. 222 с.
121. Куликов И.С. Десульфурация чугуна / И.С. Куликов. М.: Металлургия, 1962. 306 с.
122. Бабарыкин Н.Н. Восстановление и плавление рудных материалов в доменной печи: курс лекций / Н.Н. Бабарыкин. Магнитогорск: МГМА, 1995. 164 с.
123. Суханов Е.Л. Определение методом моделирования показателей доменного процесса при изменении условий плавки / Е.Л. Суханов, С.А. Загайнов, Ю.О. Раев // Изв. вузов. Черная металлургия. 1989. № 8. С. 129—133.
124. Спирин Н.А. Современные принципы проектирования и реализации пакетов прикладных программ для решения технологических задач в металлургии / Н.А. Спирин, К.А. Щипанов, В.В. Лавров, Л.Ю. Гилева, В.Ю. Рыболовлев // Международная конференция: труды. Екатеринбург: АИН, 2004.
125. Казанцев С.В. О применении методов распознавания образов при прогнозировании состава чугуна в доменной печи / С.В. Казанцев, Н.А. Спирин // IV Всероссийская научно-практическая конференция «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве»: труды. Новокузнецк: СибГИУ, 2003. С. 359—361.
126. Краснощеков П.С. Принципы построения моделей / П.С. Краснощеков, А.А. Петров. М.: МГУ, 1983. 264 с.
127. Самарский А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. М.: Наука, Физматлит, 1997. 320 с.
128. Волкова В.Н. Основы теории систем и системный анализ / В.Н. Волкова, А.А. Денисов // СПб.: СПбГТУ, 1977. 510 с.
129. Швыдкий В.С. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса: учебник для вузов / В.С. Швыдкий, Н.А. Спирин, М.Г. Ладыгичев, Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон. М.: Интермет-Инжиниринг, 1999. 520 с.
130. Загайнов С.А. Современные принципы построения математической модели доменного процесса для решения технологических задач / С.А. Загайнов, О.П. Онорин, Н.А. Спирин, Ю.Г. Ярошенко // Изв. вузов. Черная металлургия. 2003. № 12. С. 3—7.
131. Гилева Л.Ю. Оценка действующих возмущений на технико-экономические показатели работы доменной печи / Л.Ю. Гилева, Ю.Г. Ярошенко, С.А. Загайнов, С.П. Сухарева // Международная научно-техническая конференция «Теория и практика производства чугуна», 24—27 мая 2004 г.: труды. Украина. Кривой Рог, 2004. С. 233—236.
132. Загайнов С.А. Разработка и внедрение математического и программного обеспечения для гибких технологических режимов работы доменных печей / С.А. Загайнов [и др.] // Сталь. 2000. № 9. С. 12—15.
133. Краснобаев В.А. Разработка и внедрение интегрированной модельной системы поддержки принятия решений для управления доменной плавкой / В.А. Краснобаев, В.Ю. Рыболовлев, Н.А. Спирин, Л.Ю. Гилева, П.Н. Поляков // IV Всероссийская научно-практическая конференция

- «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве», 8—10 декабря 2003 г.: труды. Новокузнецк: СибГИУ, 2003. С. 366—369.
134. Загайнов С.А. Применение АСУ для решения интеллектуальных задач ведения доменной плавки / О.П. Онорин, Е.Л. Суханов, Л.Ю. Гилева // Всесоюзное научно-техническое совещание «Средства и системы автоматического управления технологическими процессами газопылеочистки в цветной металлургии», Свердловск, 1991.
135. Онорин О.П. Методы оценки минимально допустимого удельного расхода кокса при конкретных условиях доменной плавки / О.П. Онорин, С.А. Загайнов, Е.Л. Суханов, Л.Ю. Гилева // Библ. указатель ВИНТИ «Депонированные научные работы». 1990. № 6. С. 134.
136. Воскобойников В.Г. Свойства жидких доменных шлаков / В.Г. Воскобойников, Н.Е. Дунаев, А.Г. Михалевич. М.: Металлургия, 1975. 182 с.
137. Гиммельфарб А.А. Процессы восстановления и шлакообразования в доменных печах / А.А. Гиммельфарб, К.И. Котов. М.: Металлургия, 1982. 328 с.
138. Цылев Л.М. Восстановление и шлакообразование в доменном процессе / Л.М. Цылев. М.: Наука, 1970. 158 с.
139. Жило Н.Л. Формирование и свойства доменных шлаков / Н.Л. Жило. М.: Металлургия, 1974. 120 с.
140. Спири́н Н.А. Программное обеспечение моделирования шлакового режима доменной плавки при формировании подачи / Н.А. Спири́н [и др.] // Автоматизация технологических и производственных процессов: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2004. С. 188—201.
141. Спири́н Н.А. Натурно-модельный подход при решении задач оптимизации сложными распределенными системами в металлургии / Н.А. Спири́н, В.Ю. Рыболовлев, О.П. Онорин, А.И. Перминов, К.А. Щипанов // Автоматизация технологических и производственных процессов: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2004. С. 54—60.
142. Терентьев В.Л. Интегрированная модельная система поддержки принятия решений для управления доменной плавкой / В.Л. Терентьев, В.Ю. Рыболовлев, Н.А. Спири́н, Л.Ю. Гилева, С.А. Загайнов, И.Е. Косаченко // Сталь. 2004. № 9. С. 9—11.
143. Рыболовлев В.Ю. Современная технология разработки и эксплуатации распределенной базы данных в аглодоменном производстве / В.Ю. Рыболовлев, П.Н. Поляков, В.В. Лавров, Н.А. Спири́н // Международная научно-практическая конференция «Автоматизированный печной агрегат — основа энергосберегающих технологий металлургии XXI века»: труды. М.: Московский государственный институт стали и сплавов, 2000. С. 267—269.
144. Рыболовлев В.Ю. Система баз данных в аглодоменном производстве / В.Ю. Рыболовлев, П.Н. Поляков, В.В. Лавров, Н.А. Спири́н // Международная конференция «Теплофизика и информатика в металлургии: достижения и проблемы»: труды. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 2000. С. 110—114.
145. Blast furnace Phenomena and modeling / Ed. By Yasuo Omori. Elsevier applied science. London and New York. 1987. 631 p.
146. Федулов Ю.В. Прогноз теплового состояния низа доменной печи по температуре фурменной зоны / Ю.В. Федулов, А.М. Поляков, Н.А. Спири́н, В.В. Лавров // Изв. вузов. Черная металлургия. 1995. № 5. С. 54—56.



147. *Спирин Н.А.* Диагностика состояния футеровки доменных печей по температурному полю кладки / Н.А. Спирин [и др.] // *Сталь*. 1997. № 10. С. 12—18.
148. *Спирин Н.А.* Интегрированный пакет прикладных программ оптимального управления сырьевыми и топливно-энергетическими ресурсами в агломенном производстве / Н.А. Спирин, В.Ю. Рыболовлев, В.В. Лавров, О.П. Онорин, Л.Ю. Гилева, А.Ю. Перминов, К.А. Щипанов // *Международная научно-техническая конференция «Теория и практика производства чугуна», 24—27 мая 2004 г.: труды. Украина. Кривой Рог, 2004. С. 487—490.*
149. *Кутнер С.М.* Технология задувки доменных печей за рубежом / С.М. Кутнер // *Черметинформация. Серия «Подготовка сырых материалов к металлургическому переделу и производству чугуна». Выпуск 1.*
150. *Терентьев В.Л.* Показатели доменной плавки в задувочном периоде после ремонта III разряда / В.Л. Терентьев, В.П. Ташлинцев, С.К. Сибататуллин, К.Н. Вдовин // *Международный конгресс доменщиков: труды. Днепропетровск: Пороги, 1999. С. 201—204.*
151. *Капорулин В.В.* О рациональной тепловой подготовке горна при задувке доменной печи / В.В. Капорулин [и др.] // *Сталь*. № 10. 1989. С. 9—12.
152. *Жембус М.Д.* Применение азота при раздувке доменных печей / М.Д. Жембус, А.П. Монаршук, Г.А. Зуенок // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1986. № 2. С. 7—9.
153. *Спирин Н.А.* Оптимизация, идентификация и оценивание теплотехнических процессов в металлургии / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.С. Шаврин. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 1996. 188 с.
154. *Захаров И.Н.* Функциональные зависимости в процессах противоточной фильтрации. Восстановление, теплообмен и гидродинамика в доменном процессе / Под ред. С.В. Шаврина // *Институт металлургии УФАН СССР: труды. Свердловск, 1972. Ч. 2, вып. 26. С. 77—97.*
155. *Онорин О.П.* Фильтрация железистых шлаковых расплавов через коксовую насадку / О.П. Онорин, В.И. Гладышев, Л.И. Каплун // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1997. № 2. С. 11—14.
156. *Шаврин С.В.* Кинетика восстановления окислов железа расплава углеродом / С.В. Шаврин, И.Н. Захаров // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1964. № 5. С. 7—11.
157. *Балон И.Д.* Фазовые превращения материалов при доменной плавке / И.Д. Балон, И.З. Буклан, В.Н. Муравьев, Ю.Ф. Никулин. М.: Металлургия, 1984. 152 с.
158. *Буклан И.З.* О разделении в объеме доменной печи процессов восстановления и плавления / И.З. Буклан, И.Д. Балон, Ю.Ф. Никулин // *Сталь*. 1972. № 2. С. 106—109.
159. *Гребе К.* Поведение шихтовых материалов при размягчении в «замороженной» азотом доменной печи и его влияние на расход кокса / К. Гребе, Г. Де Хаас // *Черные металлы*. 1986. № 5. С. 25—32.
160. *Спирин Н.А.* Определение потерь тепла во время стоянок доменной печи / Н.А. Спирин, О.П. Онорин, В.Ю. Рыболовлев, К.А. Щипанов, А.И. Перминов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2005. № 1. С. 24—30.
161. *Кафаров В.В.* Методы кибернетики в химии и химической технологии / В.В. Кафаров. М.: Химия, 1985. 379 с.

162. *Бородулин А.В.* Математические модели оптимального использования ресурсов в доменном производстве / А.В. Бородулин [и др.]. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. 148 с.
163. *Лисиенко В.Г.* К принципу оптимального распределения ресурсов в доменном производстве / В.Г. Лисиенко, М.Н. Спирин, В.В. Лавров, К.А. Щипанов // Теория и технология металлургического производства. Вып. 2: Межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2001. С. 19—25.
164. *Лисиенко В.Г.* Идентификация и оптимальное управление процессами теплообмена в шахтных печах / В.Г. Лисиенко, Ю.Н. Овчинников, М.Н. Спирин // Международный конгресс «300 лет уральской металлургии»: труды. Секция: «Производство чугуна и стали». Екатеринбург, 2001. С. 25—27.
165. *Лисиенко В.Г.* Информационная система поддержки принятия решений распределения топливно-энергетических ресурсов в доменном производстве / В.Г. Лисиенко, С.А. Загайнов, Л.Ю. Гилева, М.Н. Спирин // Теория и технология металлургического производства. Вып. 2: Межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2001. С. 14—18.
166. *Соломахин И.С.* Планирование и управление в черной металлургии с помощью ЭВМ / И.С. Соломахин, А.Е. Фатеев. М.: Металлургия, 1972. 162 с.
167. *Цирлин А.М.* Оптимальное управление технологическими процессами: учебное пособие для вузов / А.М. Цирлин. М.: Энергоатомиздат, 1986. 400 с.
168. *Рей У.* Методы управления технологическими процессами / У. Рей. М.: Мир, 1983. 368 с.
169. *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. М.: Мир, 1975. 534 с.
170. *Сламчинская Т.И.* Методика построения оптимального плана снабжения железорудным сырьем группы металлургических заводов / Т.И. Сламчинская [и др.] // Экспресс-информация. Черная металлургия. Сер. 4 / М.: ин-т «Черметинформация» 1971. Вып. 6. С. 1—8.
171. *Гиммельфарб А.А.* Оптимальное распределение ограниченных ресурсов железа в сырье по доменным печам / А.А. Гиммельфарб, Т.И. Сламчинская // Изв. вузов. Черная металлургия. 1972. № 4. С. 166—172.
172. *Рейклейтис Г.* Оптимизация в технике / Г. Рейклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. М.: Мир, 1986. 350 с.
173. *Рожавский Л.И.* Оптимальное распределение ресурсов агломерата на металлургическом заводе методом динамического программирования / Л.И. Рожавский, И.С. Соломахин, П.М. Бурштейн // Вопросы эффективности новой техники и организации производства в черной металлургии: сборник тр. / МИСиС. М.: Металлургия, 1969. № 51. С. 139—145.
174. *Тихомиров Е.Н.* Комбинированное дутье доменных печей / Е.Н. Тихомиров. М.: Металлургия, 1974. 157 с.
175. *Тихомиров Е.Н.* Восстановительные газы и кислород в доменной плавке / Е.Н. Тихомиров. М.: Металлургия, 1982. 104 с.
176. Способ работы группы доменных печей: а.с. 652221 СССР / В.Н. Андронов [и др.] // Открытия. Изобретения. 1979. № 10. С. 114.
177. Способ работы группы доменных печей: а.с. 1518380 СССР / Ю.Н. Овчинников [и др.] // Открытия. Изобретения. 1989. № 40. С. 131.
178. *Спирин Н.А.* Оптимизация распределения природного газа в доменном цехе ММК / Н.А. Спирин [и др.] // Сталь. 1991. № 8. С. 13—18.

179. *Товаровский И.Г.* Принципы оптимизации дутьевого режима группы доменных печей / И.Г. Товаровский, В.Н. Хомич // *Металлургия и коксохимия*: сб. Киев: Техника, 1982. Вып. 75. С. 49—57.
180. *Абрамов С.Д.* Оптимизация расхода и распределения топливных добавок в доменные печи с помощью кинетико-математической модели доменного процесса / С.Д. Абрамов, Ю.А. Денисенко, А.В. Ченцов. Деп. в ВИНТИ, 1976. № 3198. С. 76.
181. *Способ работы группы доменных печей*: а.с. 1618765 СССР / А.В. Ченцов [и др.] // *Открытия. Изобретения*. 1991. № 1.
182. *Способ работы группы доменных печей*: а.с. 998507 СССР / Б.П. Довгалюк [и др.] // *Открытия. Изобретения*. 1983. № 7. С. 164.
183. *Довгалюк Б.П.* Методы контроля эффективности использования топливных добавок и технологического кислорода и их оптимального распределения между доменными печами / Б.П. Довгалюк // *Сталь*. 1987. № 8. С. 9—14.
184. *Загайнов С.А.* Решение технологических задач доменного производства с использованием вычислительной техники / Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов, О.П. Онорин, Л.Ю. Гилева // *Международный конгресс доменщиков*. Тула, 1992 г.
185. *Способ управления работой группы доменных печей*: пат. SU 1801120 / Н.А. Спири́н [и др.] // *Открытия. Изобретения*. 1993. № 3.
186. *Овчинников Ю.Н.* Разработка комплексных методов экономии топливно-энергетических ресурсов в доменных печах / Ю.Н. Овчинников [и др.] // *Международная конференция доменщиков «Витковице 1989»*: труды. Чехословакия, 1989. С. 156—176.
187. *Гилева Л.Ю.* Компьютерные системы поддержки принятия решений распределения инжестируемого топлива в доменном цехе / Л.Ю. Гилева [и др.] // *Международная конференция «Теплофизика и информатика в металлургии»*: труды. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 2000. С. 158—163.
188. *Спири́н Н.А.* Принципы построения и реализация математических моделей оптимального управления сырьевыми и топливно-энергетическими ресурсами в аглодоменном производстве / Н.А. Спири́н, В.Ю. Рыболовлев, В.В. Лавров, О.П. Онорин, А.Ю. Перминов // *IV Всероссийская научно-практическая конференция «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве»*: труды. Новокузнецк, 2003. С. 355—359.
189. *Чугель В.О.* Оптимизация распределения природного газа в группе доменных печей / В.О. Чугель, Ю.В. Смирнов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1989. № 4. С. 135—142.
190. *Гилл Ф.* Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. М.: Мир, 1985. 509 с.
191. *Деннис Дж.* Численные методы безусловной оптимизации и решение нелинейных уравнений / Дж. Деннис, Р.М. Шнабель. М.: Мир, 1988. 440 с.
192. *Онорин О.П.* Разработка современных модельных систем поддержки принятия решений в условиях нестабильности обеспечения топливно-энергетическими ресурсами доменных печей и конъюнктуры рынка / О.П. Онорин, Н.А. Спири́н, В.В. Лавров, К.А. Щипанов // *Международная конференция «Теплотехника и энергетика в металлургии»*: труды. Днепропетровск, 2002.
193. *Бояринов А.И.* Методы оптимизации в химической технологии / А.И. Бояринов, В.В. Кафаров. М.: Химия, 1975. 575 с.

194. Гольдфарб Э.М. Математическое программирование параметров комбинированного дутья / Э.М. Гольдфарб, В.П. Бородулина, Л.Я. Плевако // Изв. вузов. Черная металлургия. 1977. № 2. С. 160—163.
195. Гольдфарб Э.М. Выбор параметров комбинированного дутья с учетом нескольких критериев оптимальности / Э.М. Гольдфарб, Т.И. Сламчинская, В.П. Бородулина // Изв. вузов. Черная металлургия. 1977. № 8. С. 150—153.
196. Гиммельфарб А.А. Автоматическое управление доменным процессом / А.А. Гиммельфарб, Г.Г. Ефименко. М.: Металлургия, 1969. 309 с.
197. Довгалюк Б.П. Основные номограммы доменного процесса / Б.П. Довгалюк. Киев: Техника, 1985. 56 с.
198. Жак Р.М. Работа доменных печей с применением комбинированного дутья высоких параметров / Р.М. Жак // Бюллетень ЦИИНЧМ. 1977. № 1. С. 3—9.

## **ОНОРИН Олег Павлович**

Родился 14 октября 1939 года в Свердловской области. Окончил Уральский политехнический институт (1962). Инженер-металлург по специальности «Металлургия черных металлов». После окончания института работал на кафедре металлургии чугуна Уральского государственного технического университета — УПИ. Кандидат технических наук (1970), доцент (1973). С 2004 г. по настоящее время главный научный сотрудник отдела подготовки железорудного сырья и доменного производства Государственного научного центра Российской Федерации ОАО «Уральский институт металлов» (г. Екатеринбург).



Основное научное направление — теория и технология доменной плавки, разработка алгоритмов решения технологических задач доменной плавки. Известный специалист в области математического моделирования теплового, дутьевого, газодинамического и шлакового режимов доменной плавки. Автор более 150 печатных работ, в том числе монографии, 2-х учебников для студентов вузов, имеет 15 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации.

## **СПИРИН Николай Александрович**

Родился 24 сентября 1949 года в Свердловской области. Окончил с отличием Уральский политехнический институт (1971). Инженер-металлург по специальности «Теплофизика и автоматизация промышленных печей». Доктор технических наук (1994), профессор (1995), действительный член Академии инженерных наук России (2000). В настоящее время профессор кафедры «Тепло-



физика и информатика в металлургии» Уральского государственного технического университета — УПИ.

Основное научное направление — исследование процессов тепломассообмена и газодинамики гетерофазных сред в высокотемпературных агрегатах с плотным слоем и разработка на этой основе новых информационных систем и технологий в металлургии. Ученик профессора Б.И. Китаева. Автор 230 научных трудов, в соавторстве с коллегами и учениками им написаны 8 книг, среди них 3 монографии, 5 учебников для студентов вузов, имеет авторские свидетельства и патенты на 20 изобретений. Научный руководитель впервые открытой в России (1998) специальности «Информационные системы в металлургии». Награжден медалью ВДНХ СССР, знаком «Почетный работник высшего образования Российской Федерации».

### **ТЕРЕНТЬЕВ Владимир Лаврентьевич**



Родился 7 июля 1954 года в г. Магнитогорске. Инженер-металлург, окончил Магнитогорский горно-металлургический институт по специальности «Металлургия черных металлов» (1977). Вся трудовая деятельность связана с Магнитогорским металлургическим комбинатом. Работал в доменном цехе машинистом загрузки, газовщиком, мастером печи, начальником смены, заместителем начальника цеха, начальником цеха. Начальник технического отдела комбината — заместитель начальника управления технологии, главный металлург. В настоящее время — директор по производству ОАО ММК. Внес большой вклад в

реконструкцию доменных печей № 1 и № 2 ОАО ММК. Автор новых технологий по выплавке чугуна и ферромарганца

Кандидат технических наук (2000), автор 55 научных работ и 17 изобретений, материалы исследований представлены на многих конференциях в странах ближнего и дальнего зарубежья. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники (1999). Награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством 2-й степени».



### **ГИЛЕВА Лариса Юрьевна**

Родилась 27 апреля 1962 года в г. Свердловске. В 1984 году с отличием окончила Уральский политехнический институт. Инженер-металлург по специальности «Теплофизика, автоматизация и экология промышленных печей». С 1984 по 1988 гг. инженер, младший научный сотрудник лаборатории нормирования материальных ресурсов УралНИИЧМ, должностные обязанности — анализ и прогноз показателей работы доменных печей металлургических предприятий ВПО «Союзметаллургпрома».



С 1989 года и по настоящее время работа в Уральском государственном техническом университете — УПИ. Кандидат технических наук (1998), доцент кафедры «Металлургия железа и сплавов» (2002). Тема диссертационной работы и дальнейших научных исследований связана с разработкой компьютерных методов оценки и прогноза показателей доменной плавки по реальной информации о процессе для решения конкретных технологических задач. Результаты исследований и разработок опубликованы в монографии, 42 научных трудах и 2 патентах на изобретения.

### **РЫБОЛОВЛЕВ Валерий Юрьевич**

Родился 5 октября 1967 года в г. Магнитогорске Челябинской области. В 1990 году с отличием окончил Магнитогорский государственный педагогический институт по специальности «Математика, физика». После окончания института в течение полутора лет работал младшим научным сотрудником на кафедре информатики. В период работы в институте занимался внедрением программного обеспечения системы АСУТП агрегата непрерывного горячего алюминирования на Череповецком метал-



лургическом комбинате. В 1992 году поступил на работу в Центр автоматизированных систем управления Магнитогорского металлургического комбината. За 12 лет работы на комбинате прошел путь от рядового инженера-программиста до начальника отдела АСУ агло-доменного производства. Принимал участие в разработке и внедрении систем АСУП и АСУТП в доменном, горно-обогатительном и известняково-доломитовом производствах.

Кандидат технических наук (2002 г.), автор двух книг и 32 научных работ. Материалы исследований представлены на многих конференциях в странах ближнего и дальнего зарубежья.

### **КОСАЧЕНКО Иван Ерастович**



Родился 13 ноября 1939 году с. Янгельске Агаповского района Челябинской области. Окончил Магнитогорский индустриальный техникум по специальности «Доменное производство» (1958), вечернее отделение Магнитогорского горно-металлургического института по специальности «Металлургия черных металлов» (1967). Вся трудовая деятельность связана с доменным цехом ММК, где работал помощником машиниста вагон-весов, машинистом вагон-весов, газовщиком, мастером доменной печи, старшим производственным мас-

тером, сменным помощником начальника цеха, заместителем начальника цеха по технологии.

Участвовал в освоении технологии доменной плавки на дутье высоких параметров с подачей природного газа в горн печи, во внедрении мероприятий по выдаче чугуна и шлака по графикам с увеличением количества выпусков и др. За освоение работы доменной печи № 9 после реконструкции удостоен серебряной медали ВДНХ (1986). Заслуженный металлург РСФСР (1989), Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники (1999), присвоено звание «Ветеран труда ММК» (1985).



### **ЛАВРОВ Владислав Васильевич**

Родился 10 декабря 1970 года в г. Каменске-Уральском Свердловской области. В 1993 году с отличием окончил Уральский политехнический институт, инженер-металлург по специальности «Теплофизика, автоматизация и экология тепловых агрегатов в металлургии». С 1993 г. и по настоящее время работает в Уральском государственном техническом университете — УПИ. Кандидат технических наук (1996), доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (1998).



Основное научное направление связано с разработкой алгоритмического и программного обеспечения модельных систем поддержки принятия решений в области доменного производства. Результаты исследований и разработок опубликованы в 5 книгах, среди которых монография и 4 учебника и учебных пособий, 50 научных трудах, 3 патентах на изобретения.

### **ТЕРЕНТЬЕВ Андрей Владимирович**

Родился 28 сентября 1980 года в г. Магнитогорске. Экономист-менеджер, окончил Магнитогорский государственный технический университет (2002). С 2002 года — аспирант МГТУ по специальности «Металлургия черных и цветных металлов». Работал экономистом кислородно-конверторного цеха, а затем доменного цеха ОАО ММК с 2002 по 2004 год.

Автор 6 научных работ и 2 изобретений. Материалы изобретений представлены на конференциях СНГ и странах дальнего зарубежья. Активно участвует в разработке новых технологий черной металлургии, увеличения срока службы металлургических агрегатов, автоматизации металлургических процессов.





*Научное издание*

**Олег Павлович Онорин  
Николай Александрович Спирин  
Владимир Лаврентьевич Терентьев  
Лариса Юрьевна Гилева  
Валерий Юрьевич Рыболовлев  
Иван Ерастович Косаченко  
Владислав Васильевич Лавров  
Андрей Владимирович Терентьев**

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА**

Редактор *Л.Ю. Козьяйчева*

ИД № 06263 от 12.11.2001 г.

Подписано в печать 18.05.2005. Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ .  
Бумага типографская. Офсетная печать. Усл. печ. л. 17,45.  
Уч.-изд. л. 17,40. Тираж 300. Заказ 83. Цена «С».

Редакционно-издательский отдел ГОУ ВПО УГТУ—УПИ  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19  
Типография Уральского отделения РАН  
620019, Екатеринбург, ГСП-169, ул. С. Ковалевской, 18

